



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEZÁNÍ ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPERSEM

ABRASIVE WATER JET CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZDENĚK MIDRLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Zdeněk Midrla

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Řezání abrazivním vodním paprskem

v anglickém jazyce:

Abrasive water jet cutting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nasazení technologie řezání abrazivním vodním paprskem v podmínkách střední firmy pružně reagující na požadavky odběratelů a za podmínek expanze na zahraniční trhy.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Princip technologie abrazivního vodního paprsku.

Stávající technologické a kapacitní možnosti firmy.

Rozbor potenciální součástkové základny.

Návrh strojního vybavení provozu s ohledem na požadované kapacity.

Návrh technologie na vzorovou součástku.

Návrh rámcového uspořádání provozu.

Ekonomické zhodnocení.

Diskuze.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1. vydání. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007, 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.

KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi WJM. 1.vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4.

ČSN ISO 3207. Statistická interpretace údajů. Stanovení statistického tolerančního intervalu. Praha: Český normalizační institut, 1993, 30 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se skládá z rešerše na téma řezání abrazivním vodním paprskem a praktické části. V úvodních kapitolách jsou tak rozebírány způsoby a princip řezání vodním paprskem. Následně je řešena kvalita obrobené plochy v důsledku řezu materiálu vodním paprskem a makromechanismus úběru materiálu. Dále je rozebíráno strojní vybavení technologie na řezání vodním paprskem a na závěr jsou uvedeny výhody a porovnání s ostatními nekonvenčními technologiemi.

V praktické části je řešen návrh strojního vybavení s ohledem na kapacitní možnosti firmy a následně je vypracován návrh technologie výroby na součást příruba v sérii 630 000 kusů za rok. Na závěr je ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

Vodní paprsek, abrazivní paprsek, řezání vodním paprskem, nekonvenční technologie, kapacitní výpočty

ABSTRACT

This master thesis is consisted of literature search and practise part with focusing on the theme of abrasive water jet cutting. Introductory chapters deal with various methods and principles water jet cutting. Following chapters deal with quality of cutting surface by abrasive water jet cutting. After these chapters is introduced machine equipment of water jet cutting technology. At the end of this theoretical part are listed advantages and comparison with other unconventional technologies.

In the practical part is solved design of machinery with regard to manufacturing technology of component flange in series 630 000 pieces per year. Last chapter describes economic evaluation of production.

Key words

Water jet, abrasive water jet, water jet cutting, unconventional technology, capacity calculations

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIDRLA, Zdeněk. *Řezání abrazivním vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 86 s., 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci na téma „Řezání abrazivním vodním paprskem“ jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 19. 5. 2013

.....
Bc. Zdeněk Midrla

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky týkající se zpracování diplomové práce.

Velké poděkování patří firmě AWAC, spol. s r.o., jmenovitě pak panu Ing. Dušanovi Lukšovi a Jaroslavu Mašovi za rady a možnost řešit diplomovou práci v jejich firmě.

Na závěr bych chtěl poděkovat zejména své rodině za velkou podporu během celého studia na vysoké škole.

OBSAH

ZADÁNÍ	2
ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	5
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ	6
PODĚKOVÁNÍ	7
1. ÚVOD	9
2. PRINCIP TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU	10
2.1. Historie a vznik vodního paprsku	11
2.2. Rozdělení nekonvenčních metod obrábění	12
2.3. Princip řezání vodním paprskem	13
2.3.1. Čistý vodní paprsek	13
2.3.2. Abrasivní vodní paprsek	14
2.4. Řez materiálem a makromechanismus úběru materiálu	18
2.5. Kvalita obrobené plochy	21
2.5.1. Drsnost povrchu	21
2.6. Schéma a popis vodního paprsku	24
2.7. Strojní vybavení na řezání vodním paprskem	25
2.7.1. Generátory vysokotlaké vody	26
2.7.2. Akumulátory tlakových nárazů	28
2.7.3. Vysokotlaké potrubí	29
2.7.4. Lapač vody	29
2.8. Řezné médium	29
2.8.1. Voda jako pracovní médium	29
2.8.2. Úprava vody	30
2.8.3. Abrasivo	33
2.9. Trysky	36
2.9.1. Trysky na řezání čistou vodou	36
2.9.2. Trysky na řezání hydroabrasivním paprskem	37
2.10. Výhody technologie vodního paprsku a porovnání s ostatními nekonvenčními technologiemi	38
3. STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGICKÉ A KAPACITNÍ MOŽNOSTI FIRMY	40
3.1. Strojní vybavení	40
3.1.1. Flow Mach 4c	40
3.1.2. MicroStep AquaCut 4001.25WW	42
3.1.3. MicroStep AquaCut 4001.25	43
3.1.4. MicroStep AquaCut 1501.20W	44
3.1.5. Kompresor KAESER SX 26	45
4. ROZBOR POTENCIÁLNÍ SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY	47
5. NÁVRH STROJNÍHO VYBAVENÍ PROVOZU S OHLEDEM NA POŽADOVANÉ KAPACITY	48
5.1. Vstupní hodnoty	49
5.1.1. Roční využitelné časové fondy	49
5.1.2. Směnnost	50
5.1.3. Koeficient překračování norem	51
5.2. Výpočet počtu strojního pracoviště a jeho využití	51
5.3. Výpočet pracovníků	53
5.3.1. Výpočet výrobních dělníků	53

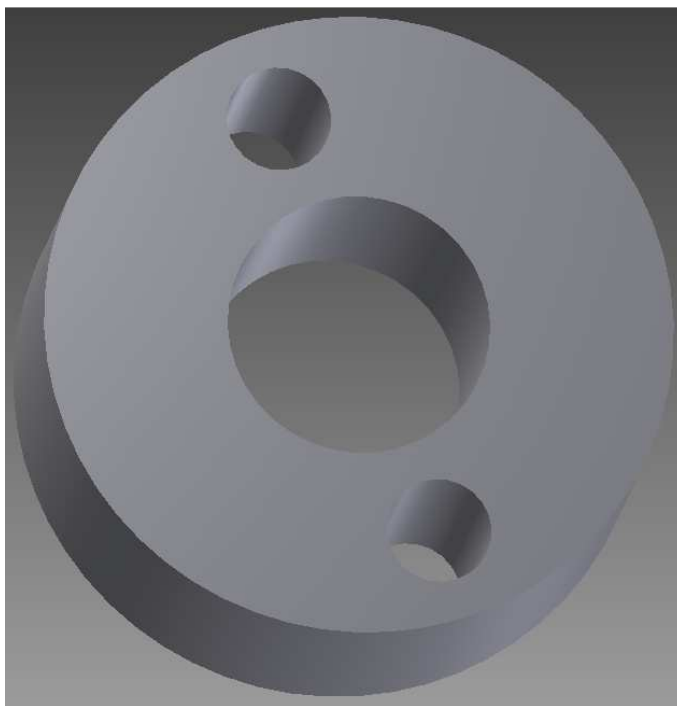
5.3.2. Výpočet pracovníků kontroly jakosti	54
5.3.3. Výpočet pomocných dělníků a obslužného personálu	54
5.3.4. Inženýrsko-techničtí a administrativní pracovníci	55
5.3.5. Celkový počet pracovníků útvaru	56
5.4. Výpočet ploch	56
5.4.1. Výpočet výrobních ploch	56
5.4.2. Výpočet pomocné podlahové plochy	57
5.4.3. Výpočet provozní podlahové plochy	60
5.4.4. Výpočet správní plochy	60
5.4.5. Výpočet sociální plochy	61
5.4.6. Celková plocha útvaru	62
6. NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY NA VZOROVOU SOUČÁST	63
6.1. Hodnocení z hlediska technologičnosti konstrukce	63
6.1.1. Dodržení tvaru a geometrie	63
6.1.2. Zvýšení produktivity práce a efektivnosti výroby	64
6.2. Volba materiálu	64
6.3. Volba polotovaru	64
6.4. Řezací plán	64
6.4.1. Varianta A	65
6.4.2. Varianta B	68
6.4.3. Porovnání obou variant	70
6.5. Vytvoření CNC programu	70
7. NÁVRH RÁMCOVÉHO USPOŘÁDÁNÍ PROVOZU	75
8. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	76
9. DISKUZE	78
ZÁVĚR	79
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	80
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	83
SEZNAM PŘÍLOH	86

1. ÚVOD

Řezání materiálu se ve velké většině případů řadí mezi první operace technologického postupu, ale zároveň může být výsledkem řezání hotová součást. Pro řezání materiálů se používá řada konvenčních i nekonvenčních metod, kde mezi nejpoužívanější patří řezání okružní pilou, řezání plasmou, řezání laserem a v této diplomové práci řešeným vodním paprskem. Technologie řezání vodním paprskem může být použita za pomoci abraziva (AWJ) nebo jako řezání čistým vodním paprskem (WJM). Tato technologie řezání materiálu využívající k řezu vysokorychlostní vodní paprsek se řadí mezi nekonvenční technologie.

Technologií řezání vodním paprskem se zabývá firma AWAC, spol. s r.o., ve které je řešena praktická část diplomové práce. Tato firma má tři provozovny, které jsou v Praze, Brně a Plzni. Všechny tři pracoviště zakázkového řezání pracují ve dvousměnném provozu s možností rozšíření provozu na tři směny.

V této firmě s letitou praxí v dané problematice řezání vodním paprskem se v rámci diplomové práce řeší především kapacitní výpočty na stanovenou součást příruba (obr.1.) v roční výrobní dávce 630 000 kusů. Výsledkem práce by se tak měl stát návrh strojního vybavení s ohledem na provedené kapacitní výpočty, určení potřebných výrobních ploch a následný návrh uspořádání provozu. Součástí práce je také návrh technologie na zvolenou součást příruba, od stanovení vhodného polotovaru po vyhotovení NC programu. Na závěr diplomové práce je ekonomické zhodnocení, ve kterém se z nákladů na hodinu provozu stroje stanoví cena jednoho kusu součásti.



Obr.1. Součást příruba

2. PRINCIP TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

V této kapitole diplomové práce se řeší historie, rozdělení nekonvenčních technologií, princip řezání vodním paprskem, řez materiálem a makromechanismus úběru materiálu, kvalita obrobene plochy, schéma a popis vodního paprsku, strojní vybavení na řezání vodním paprskem, řezné médium, trysky a na závěr této kapitoly jsou shrnuty výhody technologie vodního paprsku a porovnání s ostatními nekonvenčními technologiemi.

2.1. Historie a vznik vodního paprsku

První objevy používání vodního paprsku sahají do 19. století, kdy se zjistilo, že přivedením vody pod tlakem do úzké trysky, se získá větší působení vody a dosáhne se větší erozní účinnosti pro odběr materiálu. Tento objev byl v USA a vodní paprsek se využíval především pro odstraňování měkkých hornin kvůli získání drahých materiálů, jako je např. zlato (obr. 2.1.).¹



Obr. 2.1. Odstraňování hornin vodním proudem⁵

Nová éra využívání vodního paprsku přišla na začátku sedmdesátých let, kdy se začalo vodním paprskem řezat dřevo a plasty. Tento proces řezání využíval přeměnu vysokého tlaku proudu (380 MPa) na vysokou rychlost proudu, který tvořil řezný nástroj.¹

Úspěšné dokončení vývoje technologie řezání vodním paprskem nastal v roce 1974 zásluhou americké vládní agentury NASA, když potřebovali nařezat 34 000 kusů keramických desek na ochranu raketoplánu před teplem až 1260°C. Keramické desky s nízkou tepelnou vodivostí byli kvůli dobré aerodynamice vytvarované do bloku, spékané a až poté řezané abrazivním vodním paprskem na jednotlivé díly.²

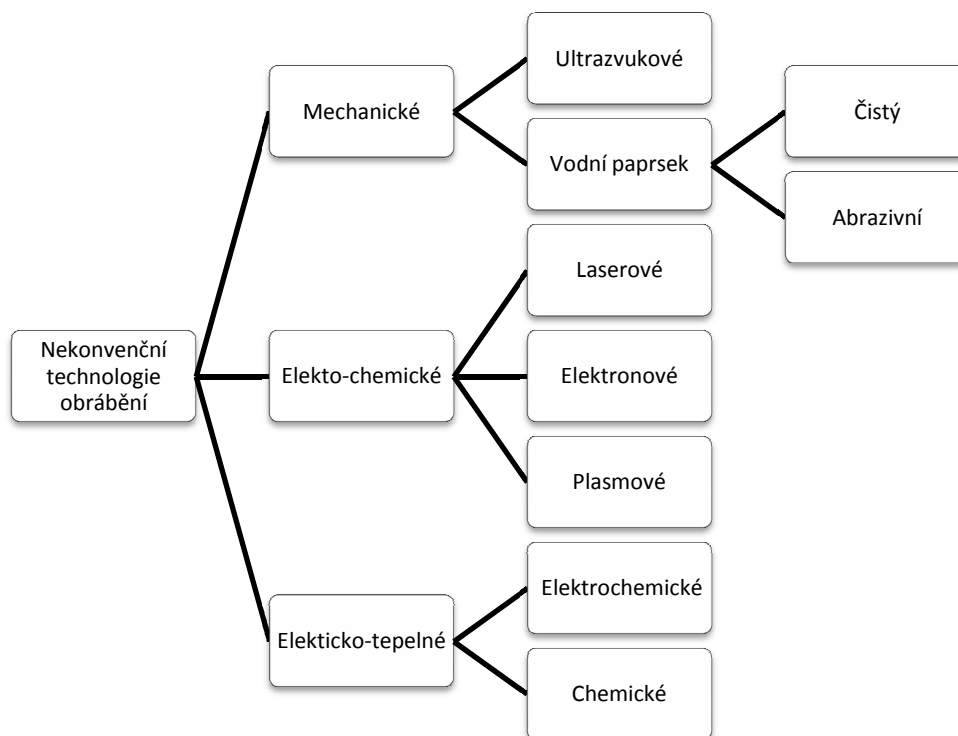
Tato národní americká agentura se od roku 1958 zabývala veškerým nevojenským výzkumem. Pro tyto účely byla vytvořena agentura Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (NASA). Hlavním podmětem vzniku této organizace byla odpověď Spojených států amerických na první vypuštění umělé družice Země – Sputniku 1, která pocházela ze Sovětského svazu.^{3,4}

Po tomto úspěchu se dále velmi intenzivně věnovalo vývoji vodního paprsku a od r. 1980 začala průmyslová výroba využívající abrazivní vodní paprsek pro řezání většiny v té době známých materiálů.²

2.2. Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Tyto metody obrábění se upřednostňují před konvenční metody především při obrábění tvarově složitých součástí nebo při obrábění těžkoobrobitelných materiálů (oceli žárupevné/žáruvzdorné, slitiny titanu, kalené oceli), protože konvenčními metodami bychom tyto tvary a materiály nevyrobili. Velkou výhodou NTO (nekonvenční technologie obrábění) je spolupráce s CAD systémy, které umožňují provádět technologické operace s využitím automatizace a mechanizace a to umožňuje snížení počtu zmetků a sériovost výroby.⁶

Nekonvenční metody obrábění by se daly charakterizovat, jako metody obrábění využívající různých fyzikálních principů, kde se nevyžaduje přímého kontaktu nástroje s obrobkem. Tyto fyzikální metody využívají fyzikálních a chemických principů k odběru materiálu bez klasické třísky, která vzniká při klasickém obrábění. Naopak konvenční metody obrábění zahrnují přímý kontakt nástroje s obrobkem a k oddělení třísky využívají řezný klín nástroje. U konvenčních metod je spousta nevýhod, jako je například opotřebení nástroje, které u NTO není.⁷



Obr. 2.2. Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění^{2, 8, 9}

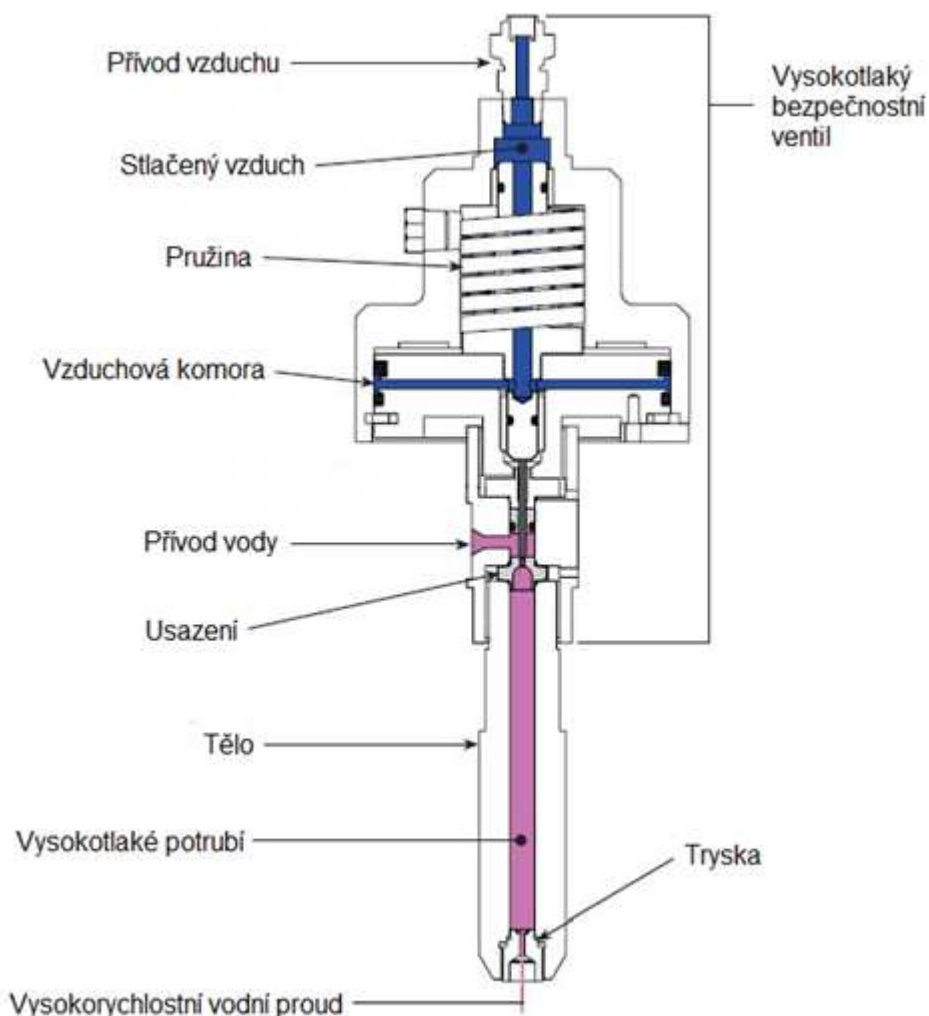
2.3. Princip řezání vodním paprskem

Metoda řezání vodním paprskem se dnes využívá především ve dvou základních metodách:

- řezání čistým vodním paprskem,
- řezání abrazivním vodním paprskem.⁹

2.3.1. Čistý vodní paprsek

Řezání čistým vodním paprskem (WJM) je původní metodou řezání kapalinovým paprskem. Pro řezání se používá voda z vodovodu, která může obsahovat rozpustné a nerozpustné minerály, takzvané usazeniny. Pro zamezení zvýšeného opotřebení trysky a ostatních zařízení se může do systému zařadit filtrace a změkčování vody.²



Obr.2.3. Schéma metody WJM¹²

Při této metodě je vodní paprsek tak silný, že řez je čistý a přesný skrz celou tloušťku materiálu bez rýh a škrábanců. Principem této metody je přeměna vysokého tlaku (až 6 200 bar) na vysokorychlostní děj za pomoci úzké trysky o vnitřním průměru 0,1 až 1.5 mm.^{2,10}

Řezání čistým vodním paprskem se používá převážně pro nekovové materiály. Mohou se řezat materiály, jako jsou:

- plasty,
- pryž,
- papír,
- jídlo,
- netkané textilie,
- vlnitá lepenka,
- izolace,
- automobilové koberce a čalounění stropu.¹⁰

2.3.2. Abrazivní vodní paprsek

Metoda řezání abrazivním vodním paprskem (AWJ) je používána v kombinaci vodního paprsku s abrazivem. Tato technologie na rozdíl od konvenčních technologií eliminuje tření mezi nástrojem a obrobkem, díky čemuž nedochází k tepelnému ovlivňování materiálu, které by mohlo nepříznivě měnit jeho vlastnosti.¹⁰

Podstatou abrazivního dělení materiálu vodním paprskem (AWJ) je obrušování děleného materiálu. Principem je úběr materiálu pomocí úzkého abrazivního paprsku dopadajícího na plochu vysokou rychlostí a kinetickou energií. Mechanický účinek úběru materiálu se zvyšuje přísadou abraziva do paprsku. Metodou AWJ lze řezat tloušťky materiálu v rozmezí od cca 1,6 mm do 305 mm.^{10, 11}

Tento systém je vynikající pro řezání složitých tvarů a křehkých materiálů, jako je například sklo, kde není tak vysoká míra poškození prasknutím skla nebo jeho odštípnutí. Toto je u konvenčních metod prakticky nemožné zaručit. Abrazivní paprsek je přesný, flexibilní a efektivní systém řezání materiálů, jako jsou například tyto:

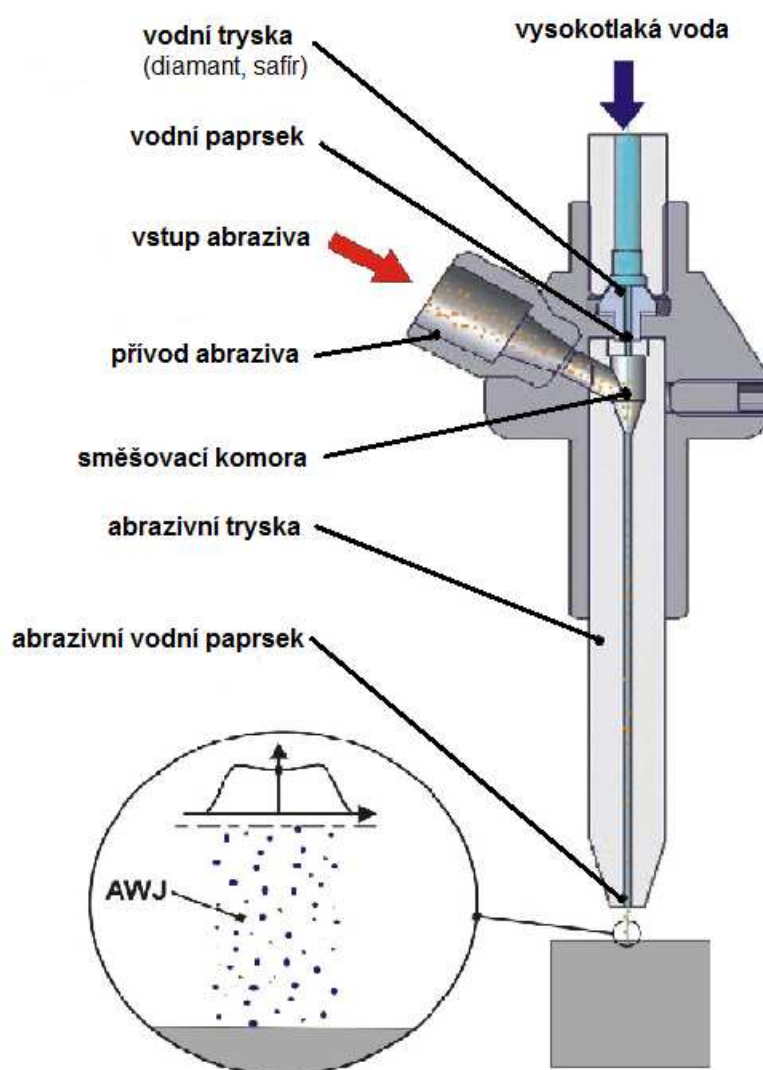
- titan,
- mosaz,
- hliník,
- kámen,
- ocel,
- sklo,
- kompozity.

Abrazivní vodní paprsek je kontinuální paprsek, do kterého se přidávají částice o malém průměru, tzv. abraziva. Rozeznáváme dva způsoby vytváření vysokotlakého abrazivního vodního paprsku:

a) metoda AWJ (Abrasive Water Jet)

Vysokotlaká voda je přiváděna vysokotlakým potrubím na vodní trysku. Vzniklý vysokorychlostní vodní paprsek pokračuje (viz. Schéma na obr. 2.4.) z vodní trysky do směšovací komory. Do směšovací komory jsou současně přiváděné abrazivní částice ze zásobníku, kde jsou pomocí vysokorychlostního vodního paprsku strhávány. Výsledná směs vody s abrazivem je dále urychlována přes abrazivní trysku.

Tento systém se používá při tlacích již od 7 do 400 Mpa s množstvím abraziva od 0,7 – 20 Kg/min, kde typ abraziva může být – jemný oxid hlinitý, granát, olivín, tříděný křemičitý písek nebo ocelová drť.²



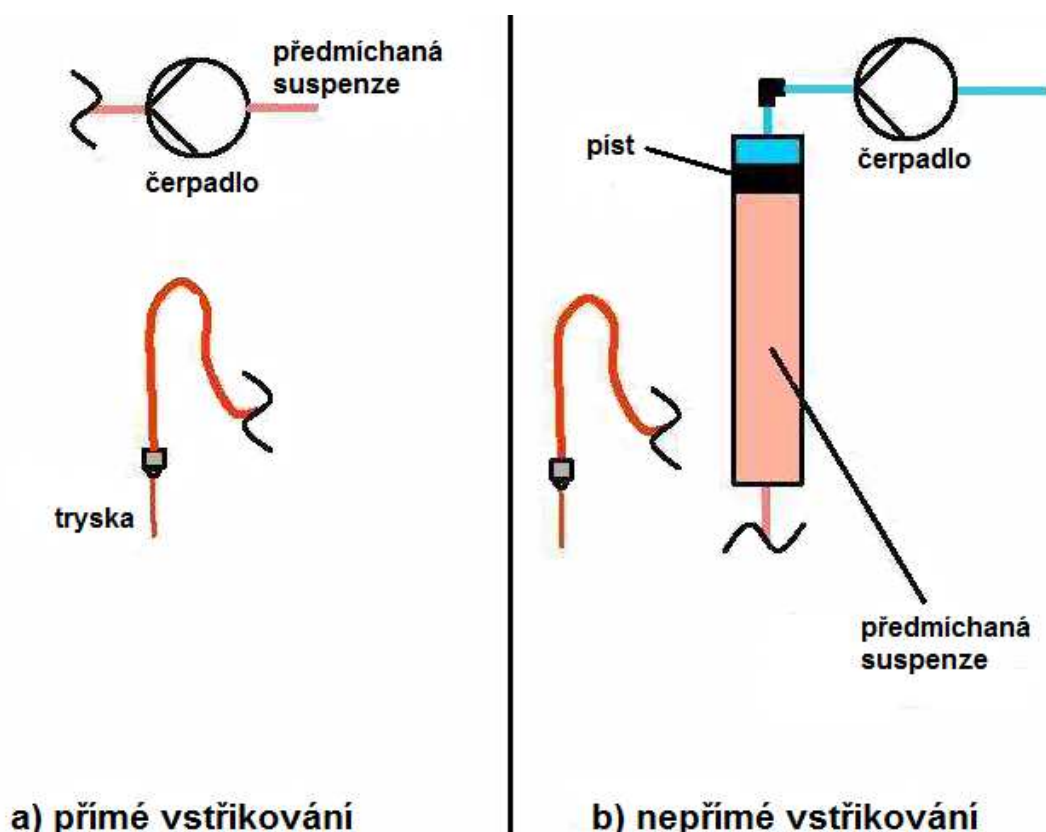
Obr. 2.4. Schéma metody AWJ¹³

b) metoda ASJ (Abrasive Suspension Jet)

Je to systém s přímým vstřikováním (DIAJET). Vysokotlaká voda je smíšená s abrazivem ve vysokotlaké nádobě. Tato stlačená suspenze je přiváděna do trysky o speciální konstrukci. U tohoto systému se využívá tlaků do 100 Mpa s množstvím abraziva i přes 20 kg/min (u přesného řezání se většinou používá množství abraziva 1 – 3 kg/min).²

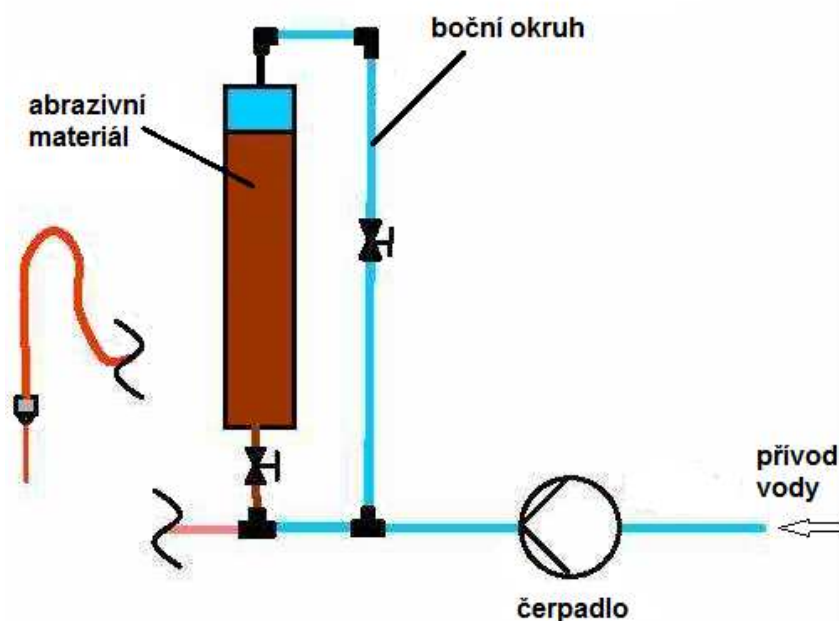
Při vývoji metody ASJ byly vynalezeny a používány tři různé typy mísení abrazivních částic a vody:

- a) *metoda přímého vstřikování* (v angličtině direct pumping) – při této metodě se abrazivo mísí s vodou za atmosférického tlaku a dále je takto předmíchaná suspenze dopravována čerpadlem do řezné hlavice, kde se průchodem tryskou mění z vysokotlakého na vysokorychlostní paprsek, který následovně dopadá na řezaný materiál. Ačkoliv je tato metoda pro použití velmi jednoduchá, tak nebyla nikdy moc používána z důvodu velkého opotřebení čerpadla abrazivní suspenzí.^{2, 14}
- b) *metoda nepřímého vstřikování* (v angličtině indirect pumping) – u této metody je princip dvou okruhů čerpaných médií. V prvním okruhu je voda dopravována čerpadlem pod stanoveným tlakem do tlakové nádoby, kde svým tlakem řídí polohu pístu. Píst tlačí vysokým tlakem předmíchanou suspenzi pryč z tlakové nádoby a dále je suspenze urychlována pomocí trysky. Za účelem stabilizace suspenze se používá vysoce koncentrovaný roztok polymeru, s viskozitou přibližně o čtyři řády vyšší než má voda. Tento roztok se tedy používá jako kapalná složka řezného média. Nevýhodou metody je omezená velikost suspenze v nádobě a z toho důvodu je omezený čas řezání, navíc dochází k opotřebení pístu a trysky abrazivem. Tyto technologické problémy omezují ekonomický a technologický úspěch této vynalezené metody.¹⁴



Obr. 2.5. a) metoda přímého vstřikování
b) metoda nepřímého vstřikování ¹⁴

- c) *metoda bočního mísení abraziva* (v angličtině bypass principle) – třetí metoda je složena ze dvou okruhů. V hlavním okruhu je dopravována tlaková voda. Část vody je vedena bočním neboli tzv. bypasovým okruhem o vysokém tlaku do mísící nádoby naplněné abrazivním materiálem, kde dochází k mísení abrazivního materiálu s tlakovou vodou. Dále je abrazivní suspenze odváděna z mísící nádoby a dochází ke sloučení s hlavním okruhem v směšovací komoře, kde se vytváří konečná řezací suspenze, která je průchodem tryskou urychlená a dopadá na řezaný materiál. Tato metoda je charakterizována stejně jako metoda nepřímého vstřikování omezenou kapacitou abrazivního materiálu. Avšak brusný zásobník může být zcela naplněn a díky tomu je doba řezání podstatně delší než u předešlé metody. Hlavní výhodou této metody je absence pístu a jiných zařízení pro vyvození tlaku abrazivní suspenze a díky tomu na rozdíl od předešlých metod nedochází k opotřebení abrazivem. ¹⁴

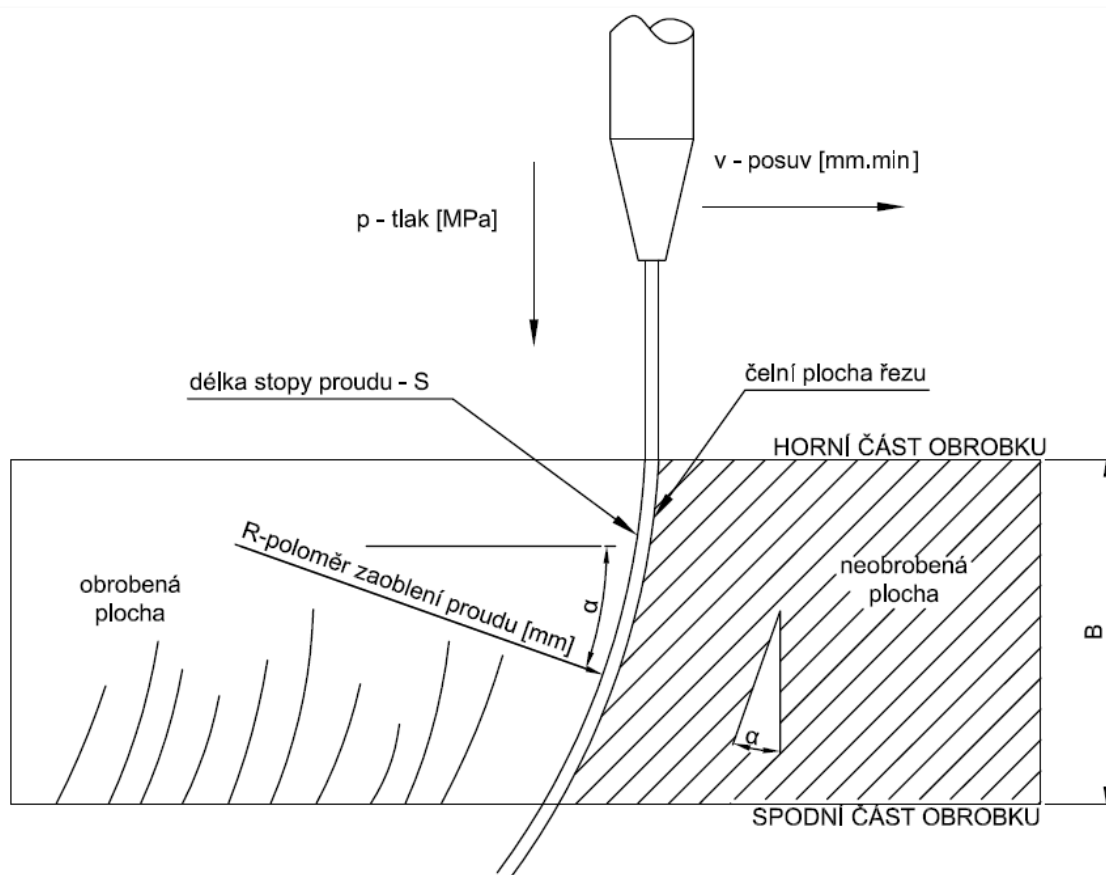


c) boční mísení abraziva

Obr. 2.6. metoda bočního mísení abraziva ¹⁴

2.4. Řez materiálem a makromechanismus úběru materiálu

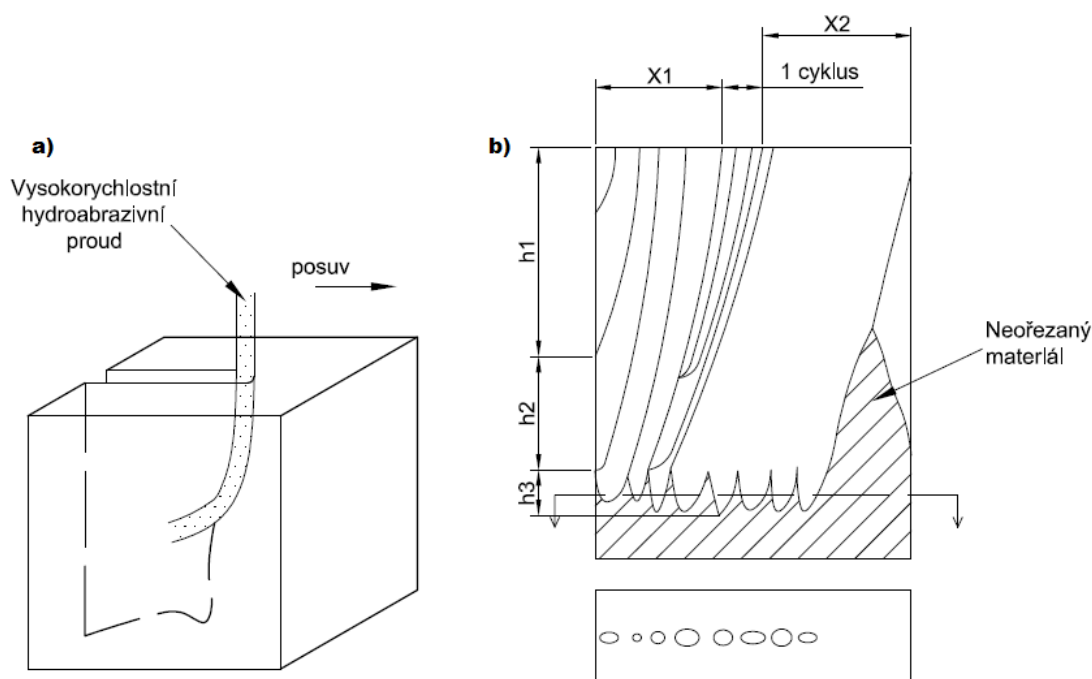
Při pronikání vodního paprsku materiálem paprsek ztrácí svoji kinetickou energii a to má za následek vychýlení paprsku. Vodní paprsek se tak pohybuje v každém bodě materiálu po zaoblené dráze a její poloměr se mění s předcházející délkou oblouku. Tento proces dělení materiálu vodním proudem je schématicky znázorněn na obr. 2.7.



Obr. 2.7. Schématické znázornění dělení materiálu vodním proudem ¹

Při úběru materiálu vysokorychlostním vodním proudem je základním principem společné působení kapalné a pevné fáze hydroabrazivního nástroje, přičemž úběr materiálu nastává jako důsledek erozivního opotřebování materiálu.

Dva hlavní rysy makroskopického způsobu úběru materiálu vysokorychlostním abrazivním proudem jsou tvar povrchu a topografie vytvořeného povrchu. Mechanismus makroskopického úběru materiálu je získaný z analýz povrchových struktur vzorků, které jsou vytvořené vysokorychlostním hydroabrazivním proudem. Řezný proces se potom autor Summers rozhodl pro lepší představu vizualizovat na experimentálním dělení, kde jako materiál byl použit vzorek plexiskla (Obr. 2.8.a). Obr. 2.8.b potom zobrazuje reliéf děleného povrchu. ¹



Obr. 2.8. a) Vizualizace procesu dělením plexiskla
b) Kontury obrobené plochy ¹

Kde platí: x_1 – vstupní oblast,
 x_2 – ustálený úsek dělení,
 h_1 – rovnoměrné dělení,
 h_2 – nerovnoměrné dělení.

Skutečný povrch se z hlediska makrogeometrie vytváří pomocí vysokorychlostního hydroabrazivního proudu tak, že se s pohybem v axiálním nebo radiálním směru vytváří zářez. Na obrobek působí částice v malých úhlech a způsobují mechanický úběr materiálu. Maximální hloubky řezu h se dosáhne ve vzdálenosti x_1 a dále postupuje cyklickým způsobem ve vzdálenosti x_2 . V horní erozní zóně h_1 nastává ustálený stav. Tato zóna je charakterizována, jako zóna ustáleného procesu, kde platí, že rychlost úběru materiálu je rovna posuvu nástroje vysokorychlostního hydroabrazivního proudu. V této zóně dominuje řezné opotřebení materiálu. Pod hloubkou h_1 nastává úběr materiálu postupně vlivem nárazů až po dosáhnutí hloubky h_2 . Pod hranicí h_1 se zároveň postupnými kroky zaobluje a mění směr, čímž se mění úhel dopadu částic. ²

Maximální hloubka je rovna:

$$h_{max} = h_1 + h_2 + h_3 \text{ [mm]} \quad (1)$$

V hloubce h_1 je materiál odstraňován řezným opotřebením, kde množství odstraněného materiálu je rovno materiálu přemístěnému. Mechanismus řezného opotřebení zaniká na hranici hloubky h_1 z důvodu vychylování hydroabrazivního proudu a částic.

Pod hranicí h_1 je deformační způsob úběru materiálu, ale zaniká ihned po vytvoření nového kroku ve vzdálenosti x_1 . Proces pokračuje do té doby, než se proud stane neúčinným v odstraňování materiálu. V poloze h_3 se proud vychyluje ve zvyšujícím se směru nahoru, což způsobuje jeho další pronikání, jako důsledek zvýšené hodnoty hybnosti. Tento proud potom uděluje vyšší hydrodynamickou zátěž na částici, která následně odstraňuje další materiál. Při vystoupení proudu z řezu vzniká zóna neodděleného materiálu ve tvaru trojúhelníku, která dokazuje, že řezný proces je ustálený jen do hloubky h_1 . Jestliže se řez nepřereže, vytváří se řez s nepravidelnou hloubkou vlivem vychylování proudu a jeho nestabilitou v dolní erozní zóně.²

2.5. Kvalita obrobené plochy

Kvalita řezné plochy a hloubka řezu jsou závislé technologické parametry, které charakterizují účinky vodního proudu na řezaný materiál. Kvalitu obrobené plochy charakterizují zejména drsnost obrobené plochy a zpevnění materiálu. U této technologie je dosažitelná průměrná aritmetická úchylna profilu R_a 3,2 a přesnost řezu $\pm 0,2$.^{1, 11}

2.5.1. Drsnost povrchu

Vytvořením řezné plochy vysokorychlostním hydroabrazivním proudem se na obrobku vytváří reliéf obsahující dvě zřetelné oblasti podél stěny řezu, které jsou charakterizovány rozdílnou texturou povrchu. Vytvořený reliéf se z hlediska kvality obrobené plochy rozlišuje na horní erozní zónu a dolní erozní zónu, kde kvalita obrobené plochy se posuzuje pomocí parametru drsnosti povrchu R_a ve svislém směru. Horní erozní zóna se vyznačuje nižšími hodnotami parametru profilu drsnosti R_a a naopak dolní erozní zóna se vyznačuje vyššími hodnotami parametru profilu drsnosti R_a .¹

Kvalita povrchu při technologii řezání vysokotlakým hydroabrazivním proudem je závislá rovněž na posuvové rychlosti řezací hlavy. Bylo zjištěno, že při menších posuvových rychlostech se objevuje zóna opotřebení materiálu v celém úseku řezu a naopak se projevuje minimálně deformační zóna, kde kazy (rýhy) nejsou téměř viditelné a úhel vychýlení paprsku od skutečného směru je minimální, viz obr. 2.9.¹¹



Obr. 2.9. Kvalita povrchu při $v = 13 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ¹¹

Naopak při vysokých rychlostech bylo zjištěno, že dvě třetiny celkové hloubky řezu tvoří zóna deformační a znatelně se vytváří kazy (rýhy), které zasahují do hloubky cca 2 mm. Viz obr. 2.10.¹¹

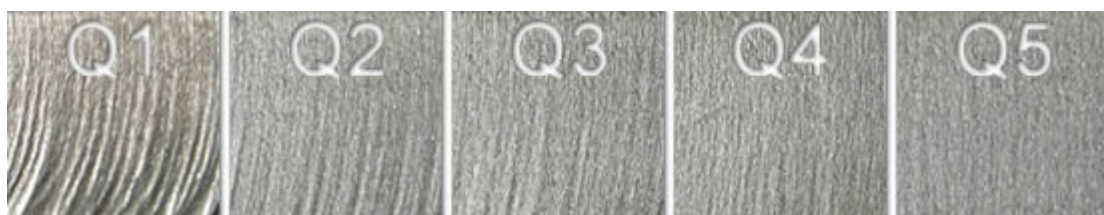


Obr. 2.10. Kvalita povrchu při $v = 53 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ¹¹

Pro posouzení kvality povrchu po technologii řezání vysokotlakým hydroabrazivním proudem se používá pět stupňů jakosti (Q1 – Q5), viz obr. 2.11. Rozdělení jednotlivých stupňů jakosti je zobrazeno v tabulce 2.1. Dosažitelná průměrná úchylka profilu je $R_a 3,2$ a přesnost řezu $\pm 0,2$.¹¹

Tab. 2.1. Rozdělení stupňů jakosti povrchu po technologii řezání vodním paprskem¹¹

Stupeň jakosti	Charakteristika	R_a v horní kontuře [mm]	R_a v dolní kontuře [mm]	Přesnost v horní kontuře [mm]	Přesnost v dolní kontuře [mm]	Úkos
Q5	nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	cca 12,5	$\pm 0,15$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q2	hrubý řez	cca 4,0	do 25	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q1	dělicí řez	4,0 - 6,3	do 40	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	výrazný úkos do +

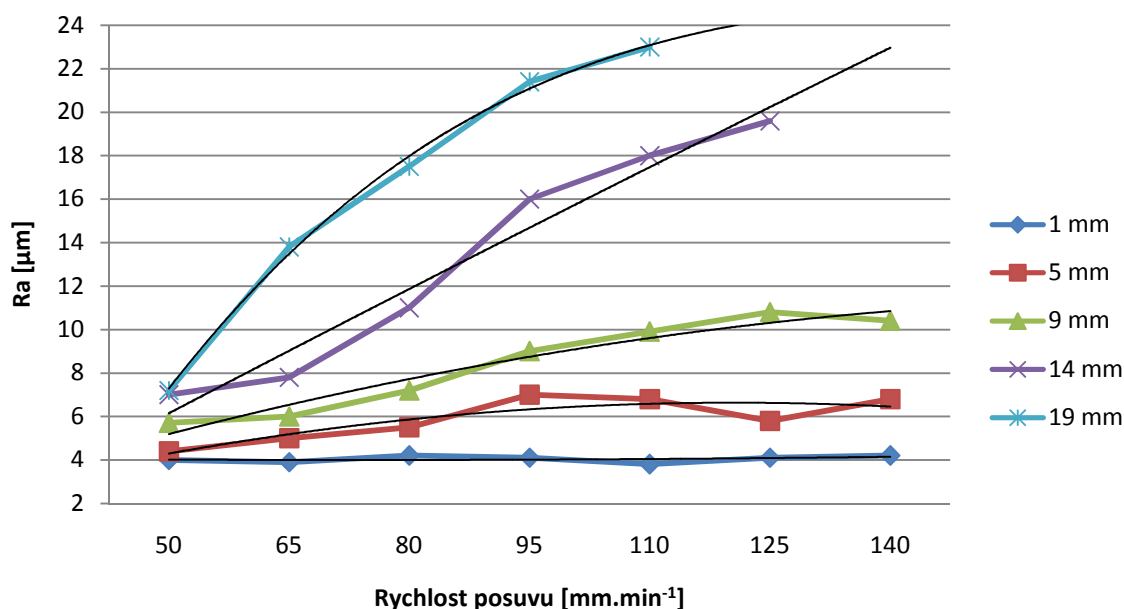


Obr. 2.11. Stupně jakosti povrchu po technologii řezání vodním paprskem ¹⁵

Kvalita plochy je definována čísly 1 – 5. Nižší stupně jakosti znamenají horší povrch řezané plochy, ztlačně se vyskytují kazy (rýhy). Úkos a přesnost v dolní kontuře jsou závislé na tloušťce a typu materiálu. Vyšší stupně jakosti se naopak vyznačují nejlepším povrchem s mírným nebo minimálním podřezem a přesností v dolní i horní kontuře v rozsahu $\pm 0,1$.

Pro samotný proces řezání vysokotlakým hydroabrazivním proudem je velmi zásadní tloušťka materiálu. Pro tenké materiály může být rozdíl v rychlosti řezání pro stupeň jakosti Q1 až třikrát rychlejší, než by byla rychlost pro stupeň jakosti Q5. Například pro hliník o tloušťce 101,6 mm by pro stupeň jakosti Q5 byla řezná rychlost $v = 18 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a pro stupeň jakosti Q1 by byla dostačující řezná rychlost $v = 107 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, což je o 5,9x vyšší řezná rychlost, než pro stupeň jakosti Q5. ¹⁵

Vliv rychlosti posuvu abrazivní hlavičky na parametr drsnosti profilu Ra

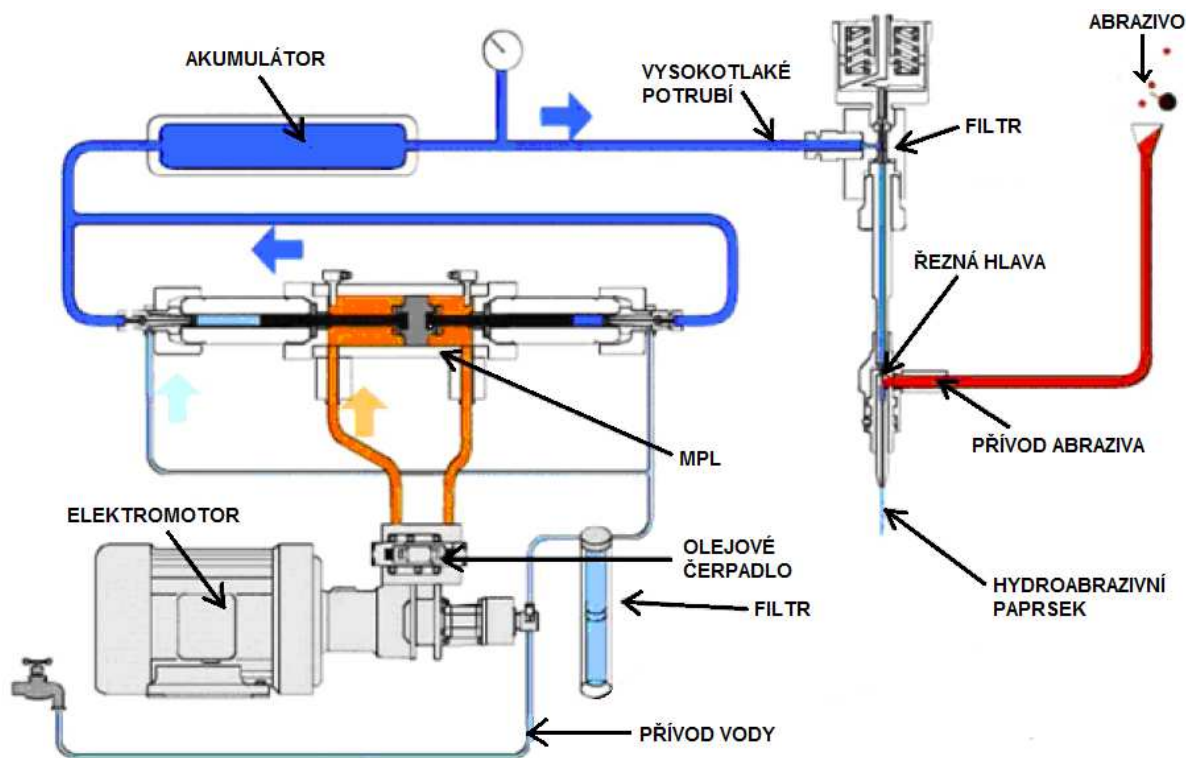


Obr. 2.12. Vliv rychlosti posuvu abrazivní hlavičky na parametr drsnosti profil Ra ¹

Vliv rychlosti posuvu na parametr drsnosti profilu R_a v různých hloubkách znázorňuje graf (Obr. 2.12.). Při zvyšující se rychlosti posuvu se snižuje hranice s hodnotou $R_a = 5 \mu\text{m}$ a při rychlosti posuvu $95 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ tato hranice dosahuje hloubky 1 milimetru. Tento výsledek zjištěný z grafu Obr. 2.12. potvrzuje, že zóna s relativně malou drsností se zvětšuje a může se objevovat i ve větších hloubkách řezaného materiálu při snižování rychlosti posuvu. Například při dělení materiálu v hloubce 19 mm s řeznou rychlostí $95 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ můžeme dosáhnout hodnoty profilu drsnosti R_a v rozsahu 21 – 23 $[\mu\text{m}]$. Naopak v hloubce nižší, například v hloubce 5 mm dosahujeme při stejné řezné rychlosti hodnoty profilu drsnosti R_a v rozsahu jen 6 – 8 $[\mu\text{m}]$. Z toho vyplývá, že se zvětšující hloubkou se vyskytují oblasti s vyššími hodnotami profilu drsnosti R_a .¹

2.6. Schéma a popis vodního paprsku

U technologického procesu, dělení materiálu hydroabrazivní erozí, se řez uskutečňuje pomocí nástroje – vysokorychlostní hydroabrazivní proud. Základním principem je přeměna vysokotlaké vody na vodu vysokorychlostní za pomoci zúžené trysky. Při samotném procesu řezání se tak nástroj neotupuje, avšak při vytváření vysokorychlostního hydroabrazivního proudu dochází k opotřebování zaostřovací trysky, důsledkem dopadu pevné fáze (abraziva) na vnitřní stranu trysky. Základní technologická sestava technologie pro dělení materiálu vysokorychlostním hydroabrazivním proudem je znázorněna na Obr. 2.13.¹



Obr. 2.13. Základní technologická sestava pro dělení vodním paprskem¹¹

Celý systém pro řezání abrazivním vodním paprskem se skládá z více komponent. Mezi základní části systému patří vysokotlaké čerpadlo (multiplikátor), které se stará o zvýšení tlaku vody a umožňuje tak vytvořit pracovní tlak 200 – 400 MPa. Multiplikátor má primární a sekundární okruh, přičemž primární okruh (na obr.2.13. je znázorněn oranžovou barvou) je tvořen olejovým čerpadlem, které dodává olej o tlaku do 20 MPa. Olej je veden přes uzavírací ventil, který umožňuje okamžité přerušení průtoku střídavě před i za píst vysokotlakého čerpadla – multiplikátoru. Píst zvýší tlak v tlakové komoře, do které je přiváděna voda přes speciální filtr. Z multiplikátoru je dále přes zpětné ventily vedena vysokotlaká voda sekundárním okruhem do akumulátoru. Akumulátor je ve formě vysokotlaké pancéřované komory, jehož funkcí je tlumit rázy vzniklé v komorách multiplikátoru. Voda je dále vedena vysokotlakým potrubím do směšovací komory, která je zakončena safírovou tryskou o průměru 0,25 – 2 mm, ze které vytéká paprsek nadzvukovou rychlostí ($700 - 1200 \text{ m.s}^{-1}$). Do speciálně tvarované otěruvzdorné směšovací komory je také přes ventil s klapkou přiváděno brusivo (SiC, diamantový prach, elektrokorund), které je umístěno v zásobníku. Ve směšovací komoře potom dochází k smíšení vody s abrazivem. Pod pevnou tryskou s hydroabrazivním vysokotlakým paprskem se pohybuje stůl s řezaným materiálem, pod kterým je vodní nádrž.¹⁶

Tab. 2.2. Základní parametry pro hydroabrazivní vysokotlaké řezání¹⁷

pracovní tlak vody	$p = 200 - 300 \text{ MPa}$
průměr vodní trysky	$d_n \geq 0,25 \text{ mm}$
množství vody	$Q = 2 - 6 \text{ l.min}^{-1}$
množství abraziva	$M = 0,2 - 1,5 \text{ kg.min}^{-1}$
vzdálenost vstupní trysky od materiálu	$A_t = 2 - 10 \text{ mm}$
průměr výstupní trysky	$d_m = 0,8 - 2 \text{ mm}$

2.7. Strojní vybavení na řezání vodním paprskem

Hydraulické zařízení na vytvoření vysokorychlostního vodního paprsku se skládá ze dvou okruhů:

- z primárního (nizkotlakého),
- ze sekundárního (vysokotlakého).

Sekundární okruh je řízený primárním okruhem prostřednictvím tlaku kapaliny vyvozené hydraulickou jednotkou.

Mezi hlavní části sekundárního (vysokotlakého) okruhu patří: ²

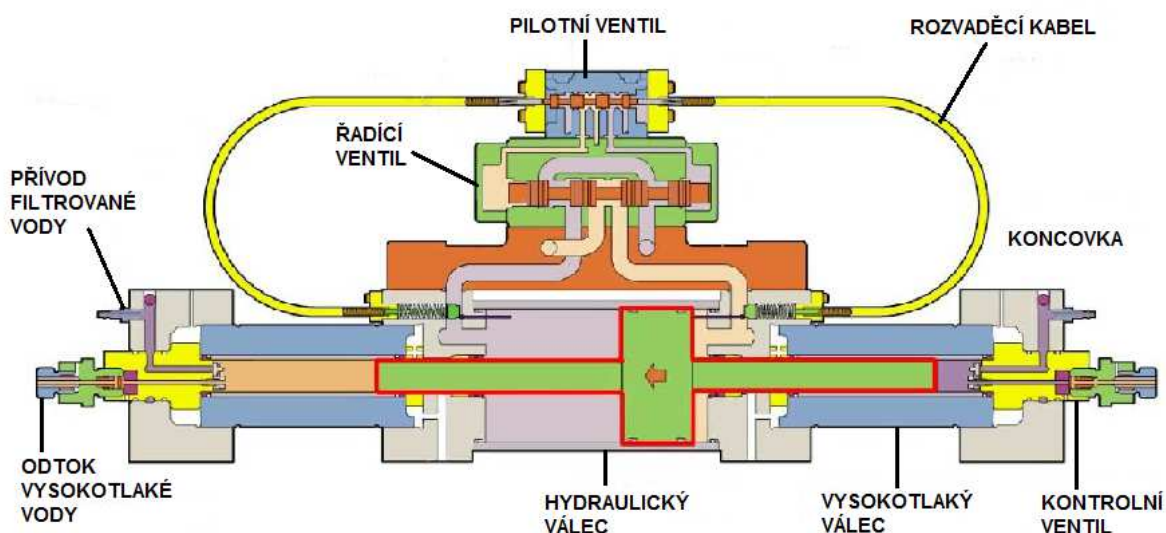
- generátor tlaku – zdroj tlakové kapaliny,
- filtr – je umístěn za přívodem vody a před vstupem do generátoru tlaku filtruje kapalinu odloučením nečistot velikosti už od 1, 2 a 5 μm ,
- akumulátor – vysokotlaká nádoba pohlcující rázy kapaliny,
- ventily – umožňují krátkodobé nebo úplné přerušení průtoku kapaliny a tím řídí režim dělení materiálu,
- rozváděcí elementy – starají se o přenos kapaliny do míst obrábění prostřednictvím hadic, potrubí atd.,
- výstupní dýzy – je to nejdůležitější komponenta z hlediska vodního paprsku, přímo ovlivňuje vlastnosti vodního paprsku a tím kvalitu řezu.

2.7.1. Generátory vysokotlaké vody

V současné době se využívají dva typy generátorů vysokého tlaku vodního paprsku. Pro vysoké tlaky se používá zařízení s multiplikátorem (až 650 MPa) a pro nízké a střední tlaky (do 300 MPa) se používá triplexová pístová čerpadla. Zařízení s multiplikátorem vyrábí např. americká firma Flow Systems a triplexová pístová čerpadla vyrábí např. japonská firma Sugino Machine, Ltd.²

a) Multiplikátor

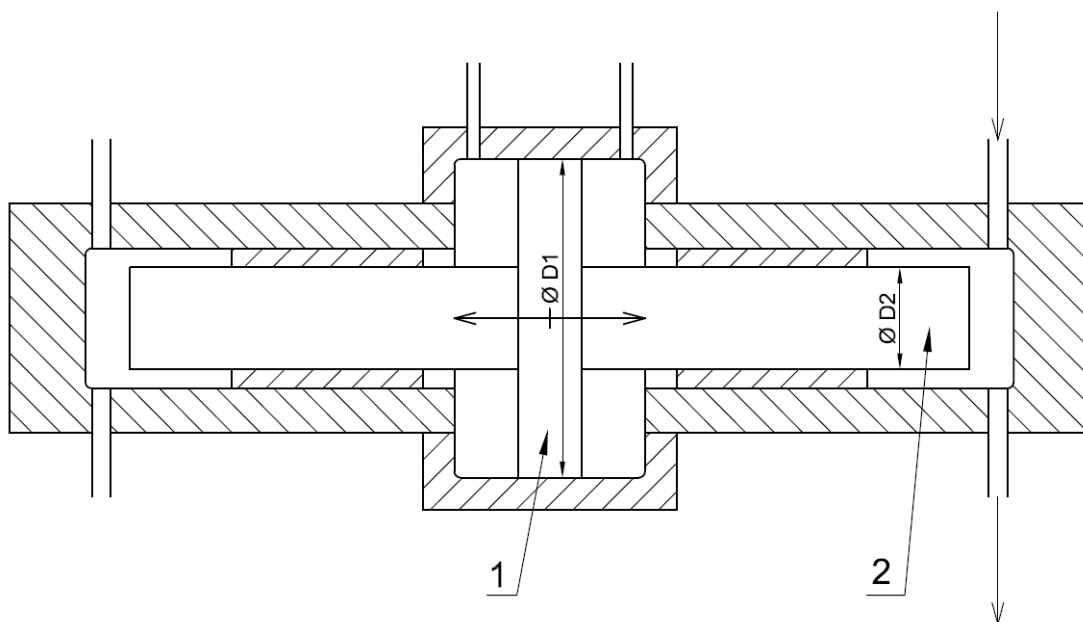
Při použití zařízení s multiplikátorem (obr. 2.14.) se pro vyvození tlaku využívá hydraulického řízení pohybu pístu. Při tomto systému s multiplikátorem je nutno do systému zařadit akumulátor tlakových nárazů, protože vlivem změny polohy pístu v multiplikátoru vzniká pulzování tlakové vody. Akumulátor se tedy stará o udržení tlaku vody na konstantní hodnotě a takto usměrněná voda dále vstupuje vysokotlakým potrubím do řezné hlavy.²



Obr. 2.14. Schéma multiplikátoru ¹²

U zařízení s multiplikátorem princip generování vysokého tlaku spočívá v rozdělení dvou ploch pohyblivým pístem. Na píst působí tlak oleje, který je do multiplikátoru přiváděn primárním (nízkotlakým) okruhem. Na druhou stranu pístu je do multiplikátoru přiváděna sekundárním (vysokotlakým)

okruhem přefiltrovaná voda. Na obr. 2.15. je schematicky znázorněn princip funkce dvojčinného multiplikátoru.²



Obr. 2.15. Schématické znázornění principu funkce dvojčinného multiplikátoru (1 – nízkotlaký a 2 – vysokotlaký píst)²

Jestliže působí olej tlakem P_1 na píst o ploše S_1 , potom podle Pascalova zákona bude tlak P_2 tolikrát větší, kolikrát je menší plocha S_2 oproti ploše S_1 . Pro použití dvojčinného multiplikátoru lze tento zákon interpretovat následujícím vztahem (2):²

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \text{ [Pa]} \quad (2)$$

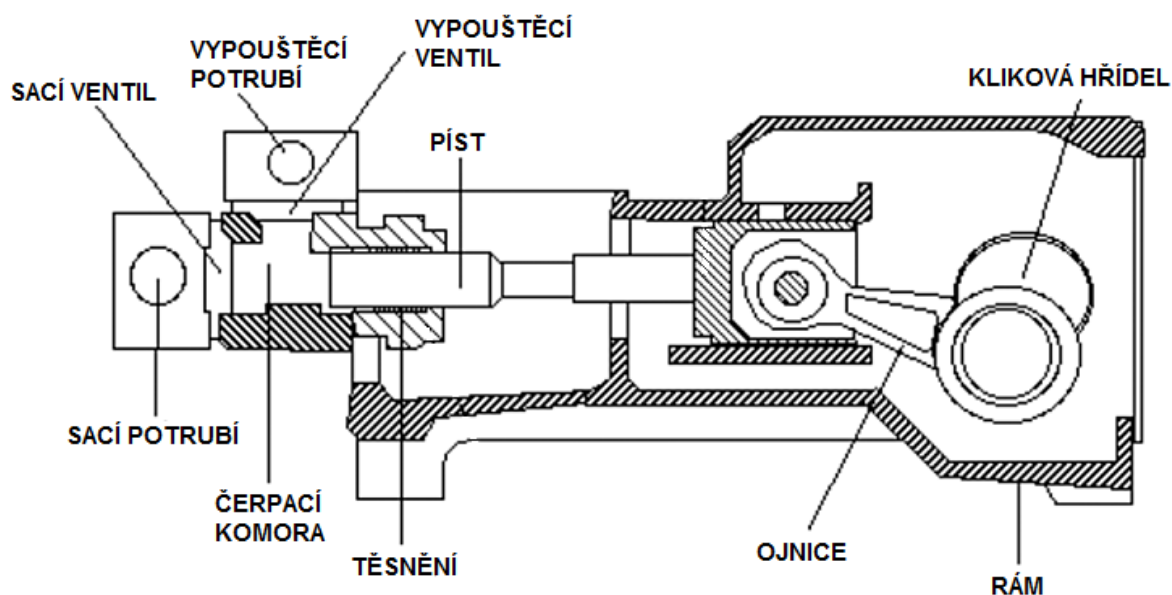
Tento vztah by byl ovšem pouze v teoretické rovině. Jelikož při činnosti multiplikátoru dochází ke ztrátám, jako jsou ztráty v netěsnostech a ztráty hydrodynamické, tak pro reálnější výpočet je potřeba do vztahu dosadit hodnotu $\eta_m = 0,95$. Výpočtový vztah (3) bude mít po dosazení hodnoty η_m následující tvar:²

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \cdot \eta_m \text{ [Pa]} \quad (3)$$

Ze vztahu (3) je patrné, že změnou ploch S_1 a S_2 , nebo regulací tlaku P_1 je možné ovlivnit provozní parametry.²

b) Pístová čerpadla

Hlavními součástmi u plunžrových (pístových) čerpadel je válec a píst, který koná přímočaře vratný pohyb. V hlavě válce jsou instalovány sací a výtlačné ventily. Na obr. 2.16. je zobrazeno schéma pístového čerpadla.¹⁸

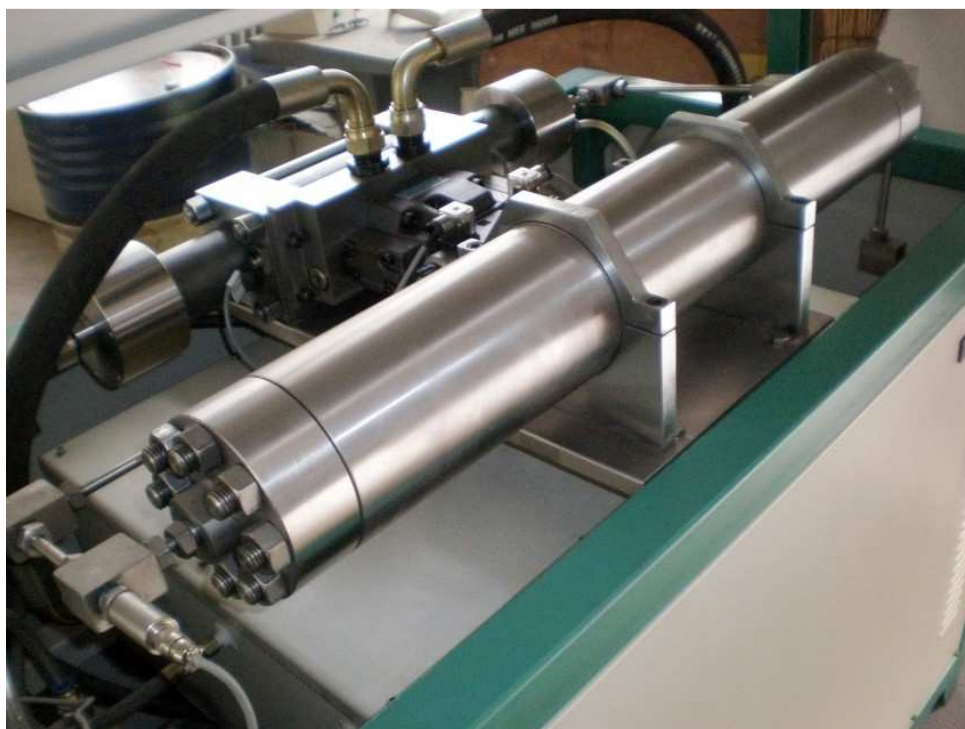
Obr. 2.16. Schéma pístového čerpadla ¹⁸

Při sacím zdvihu se píst (plunžr) posouvá směrem k dolní úvratí a válec se přes otevřený sací ventil plní vodou. Následuje reverzní pohyb pístu a stoupá tlak ve válci. Ventily pro přívod vody se uzavřou a voda je vysokým tlakem vytlačena do vysokotlakého potrubí přes otevřené výtlačné ventily. ¹⁸

Při použití pístového čerpadla s jedním válcem je problémem vznik pulzující tlakové vody, protože maximální průtok vody přes výtlačné ventily do vysokotlakového potrubí nastává pouze při zpětném pohybu pístu, v jiných polohách pístu je průtok vody nulový. Proto se nejčastěji využívá pístového čerpadla se dvěma a více válci, pracujícími v jiné frekvenci. Při tomto systému odpadá potřeba zařazení akumulátoru tlakových nárazů. ^{2, 18}

2.7.2. Akumulátor tlakových nárazů

Zařízení používané pro tlumení rázů v kapalině, které je vyvolané vznikem pulzování vodního proudu, jako důsledek stlačené vody se nazývá akumulátor tlaku. Akumulátor (obr. 2.17.) je dutá tlaková nádoba o daném objemu, ve kterém je voda stlačena na požadovaný tlak. Po dosažení vyrovnaného tlaku se voda dostává z akumulátoru do vysokotlakého potrubí. Úlohou akumulátoru je tedy udržovat stejnou rychlost a stejný tlak vysokotlakého proudu v systému. ¹⁹

Obr. 2.17. Akumulátor tlaku ²⁰

2.7.3. Vysokotlaké potrubí

Vysokotlaké potrubí je sestaveno z různých druhů armatur a spojovacích elementů. Potrubí na rozvod vysokotlaké vody je vyrobeno z korozi-vzdorné oceli o průměru $6 \div 14$ mm. Všechny komponenty na rozvod vody se vyrábí normalizované a standardizované. ¹⁹

2.7.4. Lapač vody

Úlohou lapače je zachytávání vodního paprsku, který projde přes řezaný materiál. Lapač slouží také k zachytávání třísek a tlumení hluku, kdy při řezání AWJ paprskem hodnota hluku dosahuje až 105 dB. Jako lapač vody se používá nádoba, která musí být dostatečně hluboká, aby došlo k lámání vodního paprsku dříve, než paprsek dosáhne dna nádoby. Nádoba by měla být vysoká $300 \div 600$ mm a v případě nedostatku prostoru může být použita nižší nádoba naplněná kovovými kuličkami. ¹⁹

2.8. Řezné médium

Jako řezný nástroj se při obrábění vysokorychlostním hydroabrazivním proudem používá vodní paprsek. Médium pro řezání tvoří voda (WJM) nebo voda s abrazivem (AWJ).

2.8.1. Voda jako pracovní médium

Voda (H_2O) byla zvolena pracovním médiem z důvodů nejlepší dostupnosti, je nejlevnějším médiem a není agresivní při styku s obsluhou. Nevýhodou vody je její korozivní účinek na kovové části v systému. Korozi se zabraňuje tak, že všechna zařízení jsou vyráběna z korozi-vzdorných materiálů. Voda může mít negativní vliv na technologické parametry obrábění materiálů, a proto se tyto negativní vlivy eliminují použitím různých aditiv. Aditiva rozpuštěná ve vodě

potom zvyšují rychlost kapaliny vytékající z trysky a zároveň zlepšují kompaktnost.²

Jako aditiva se nejvíce osvědčily roztoky vody a některých látek, např. polyetylenoxid (PEO), polyvinylalkohol, carboxymethylcelulóza a polyakrylamid (PAA). Tyto aditiva vytvářejí souvislý paprsek i po kontaktu s materiálem. Díky tomu je energie koncentrována na menší plochu a oproti čisté vodě se vodní paprsek s aditivou stává účinnější.²

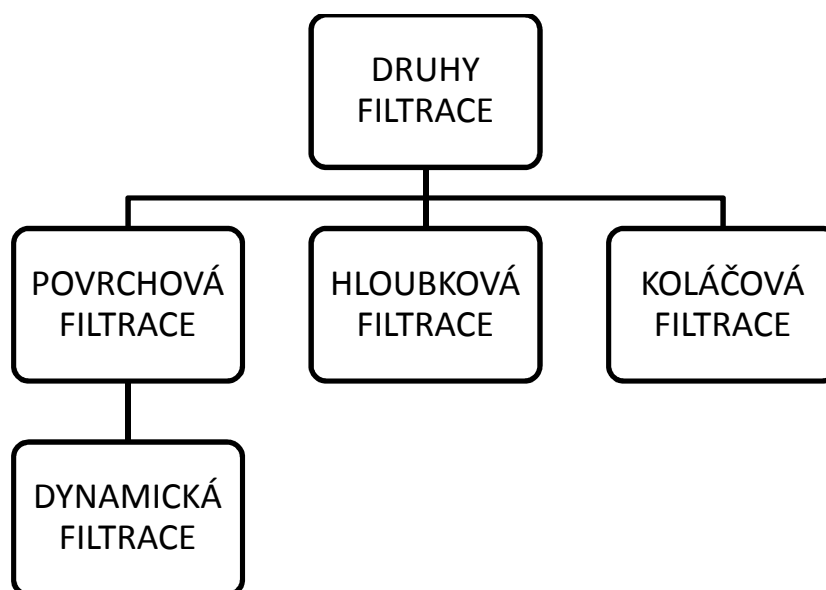
2.8.2. Úprava vody

Úprava vody je velmi důležitá, jako prevence proti zanášení otvoru trysky. Pro použití je nejvýhodnější voda demineralizovaná a neionizovaná. Voda musí být odfiltrována od různých příměsí, které by měly tendenci ucpávat trysku. Způsob úpravy vody závisí na výrobci zařízení a každá firma uvádí požadavky na dodávané zařízení v závislosti na kvalitě pracovního média. Kvalita vody ovlivňuje životnost trysky, těsnění, ventilů a dalších zařízení, stejně jako kvalitu řezu, rychlost řezání a provozní náklady. Náklady na filtraci rostou zejména, pokud chce uživatel zařízení používat vodu opakovaně, v tzv. uzavřeném cyklu.^{2, 19}

Postupy na úpravu vody se dělí následovně:

- mechanická úprava vody (filtrace),
- fyzikálně – chemická úprava vody,
- biologická úprava vody.²

Fyzikálně – chemická a biologická úprava vody se používá zejména na zabezpečení kvality vody vypouštěné do kanalizace. Na obr. 2.18. je znázorněno rozdělení filtrace. Pro mechanickou úpravu vody se používá zejména filtrace hloubková a koláčová.²



Obr. 2.18. Druhy filtrace vody²

Při WJM se vyžaduje použít filtraci, změkčování, deionizaci a zpětnou osmózu.²

a) Filtrace

Nerozpuštěné látky ve vodě způsobují zkrácení životnosti trysky a sady těsnění, proto se používají kvalitní filtry, které brání velkým částicím v pronikání do systému. Špatná kvalita vody má tedy negativní vliv i na provozní náklady.¹²

Nejčastěji se používá hloubkový filtr (obr. 2.19.), který se skládá ze 4 vrstev. První vrstva slouží pro zachytávání velkých částic. Druhá vrstva zachytává jemnější a spodní čtvrtá vrstva zachytává nejjemnější částice. Díky tomu je filtr využíván ve všech vrstvách. Hloubkové filtry dokážou zachytávat částice o velikosti 10 mikrometrů. Když je filtr zaplněný, tak se musí vyčistit tak, že částice se vyplaví z nádržky zpětným propláchnutím a následně je filtr připravený na další používání. Velikost hloubkového filtru závisí na množství vody v systému na řezání vodním paprskem. Hloubka filtru je od 150 ÷ 2 500 mm.²



Obr. 2.19. Filtrační systém firmy Flow¹²

b) Změkčování vody

Proces změkčování vody se doporučuje používat, jako úpravu vody před deionizací nebo zpětnou osmózou. Tvrdost vody je v podstatě koncentrace hořčíku a vápníku. Na určení tvrdosti vody se používá stupnice, která je zobrazena v tabulce 2.3. Pro měření tvrdosti vody se jako jednotka používá mmol.l^{-1} , v Německu se používají stupně °DH a ve Francii °F. Převod mezi jednotkami tvrdosti je znázorněn v tabulce 2.4.^{2, 21}

Tab. 2.3. Rozdělení tvrdosti vody ²¹

voda	mmol.l ⁻¹	°DH	°F
velmi tvrdá	> 3,76	> 21,01	> 37,51
tvrdá	2,51 – 3,75	14,01 – 21	25,01 – 37,5
středně tvrdá	1,26 – 2,5	7,01 – 14	12,51 – 25
měkká	0,7 – 1,25	3,9 – 7	7 – 12,5
velmi měkká	< 0,5	< 2,8	< 5

Tab. 2.4. Převod mezi jednotkami tvrdosti ²¹

1 mmol.l ⁻¹ = 5,6 °DH
1 mmol.l ⁻¹ = 10 °F
1°DH = 1,79 °F

Zařízení na změkčování vody iontovou výměnou se skládá z nádobky s pryskyřicí, nádobky se slanou vodou a kontrolní záklopy. Voda stéká přes pryskyřičné řečiště, tedy plastický materiál obsahující milión malých zrněk. Vápník a hořčík (kladně nabitě náboje) jsou při přechodu skrz zrnka přitahované a zadržené záporně nabitými částmi pórovitých pryskyřičných zrněk. Výsledná změkčená voda obsahuje sodík, protože sodíkové ionty na zrnkách jsou uvolněné a vypuštěné z vody. Množství uvolněného sodíku odpovídá množství vápníku a hořčíku, protože iontová výměna probíhá v poměru 1:1. ²

c) Zpětná osmóza

Zpětná (reverzní) osmóza je proces produkující vysoce kvalitní vodu. Voda se očišťuje tak, že je vysokým tlakem tlačena přes polopropustnou membránu, která zachytává nečistoty a odplavuje je do odtoku. Při zpětné osmóze je zabezpečeno odstranění 97 ÷ 98 % nečistot. Výrobci systémů zaručují odstranění 95 %, ale v praxi je míra odstranění vyšší. ²

d) Deionizace

Proces deionizace využívá stejně jako změkčování proces výměny iontů. Deionizace je ale proces složitější, protože používá pryskyřici kationovou a aniontovou, které jsou umístěné zvlášť ve dvou nádržkách. Při průchodu vody přes kationtovou pryskyřici, jsou různé kationty jako uhlík, železo a hořčík přesunuty volnými minerály kyselin. Následně voda pokračuje přes aniontovou jednotku, kde jsou anionty, chloridy a sulfáty posunuté a nahrazené hydroxidy. Hydroxidy se slučují a tvoří očištěnou vodu od všech iontových nečistot. ²

Deionizace i zpětná osmóza zaručují vhodnou kvalitu vody pro systém vodního paprsku. Hlavní výhody deionizace jsou:

- Stoprocentní odstranění úplně rozpuštěných částic,
- životnost minerálního řečiště je delší než životnost membrány,
- prostorově je méně náročná než zpětná osmóza. ²

Hlavní výhody zpětné osmózy jsou:

- menší operační náklady,
- je míň agresivní než neionizovaná voda,
- výkonnost při odstraňování částic a mikroorganismů,
- nepoužívají se nebezpečné chemikálie,
- má ustálenější pH a konzistentní kvalitu. ²

Firmy Ingersoll – Rand a Flow Systems zavedly pro svoje zákazníky předpisy s doporučenými hodnotami nečistot:

- celkové množství rozpuštěných pevných látek (TDS): max. 500 mg.l⁻¹,
- celková tvrdost (ve formě CaCO₃): max. 25 mg.l⁻¹,
- obsah železa (ve formě Fe): max. 0,2 mg.l⁻¹,
- obsah manganu (ve formě Mn): max. 0,1 mg.l⁻¹,
- obsah chloridu (ve formě Cl): max. 100 mg.l⁻¹,
- obsah zákalu: max. 5 NTU,
- obsah volného chlóru (ve formě Cl₂): max. 1,0 mg.l⁻¹,
- faktor pH: 6,5 ÷ 8,5. ²

2.8.3. Abrazivo

Řezné médium obsahující abrazivo se používá pro řezání tvrdých materiálů, jako např.: ocel, titan, SK, kámen a kobalt. Výhodou je možnost řezání více vrstev materiálu. Rychlost řezání závisí na množství abraziva ve vodním paprsku a pohybuje se od 10 m.min⁻¹ (sklo, hliník) až do 2500 m.min⁻¹ (papír). Při použití vodního paprsku s abrazivem je konečný proud zachycován ve vaně s kuličkami. ¹¹

Jako abrazivní materiály se používají:

- karbid křemíku SiC,
- kysličník hlinitý Al₂O₃ (elektrokorund),
- diamantový prach,
- olivín zelený,
- granát indický. ^{9, 11}

Druh použitého abraziva ovlivňuje především životnost trysky. U abraziva se posuzuje zrnitost, která je doporučována v rozsahu 16 ÷ 63 (160 ÷ 630 μm dle ČSN 22 4012). Příčný rozměr zrna je cca 0,15 mm. ^{9, 11}

Pro velikost abraziva platí, že čím větší je zrna, tím je větší úběr materiálu a naopak velmi jemná zrnitost je vhodná pro dokončování součástí. Zrnitost tedy znatelně ovlivňuje kvalitu povrchu. Brusný účinek na materiál závisí na:

- velikosti zrna,
- velikosti protlačovacího tlaku,
- koncentraci brusného prášku v řezném médiu,
- tvrdosti obráběného materiálu. ¹⁹

Dosažitelná průměrná aritmetická úchylka profilu je v rozsahu Ra 0,15 ± 1,5 μm. Kvalita povrchu je ovlivněná výškou materiálu, velikostí zrna a druhem

použitého abraziva (viz.tab.2.5.). Rozměrová tolerance je dosažitelná v rozsahu $0,05 \div 0,13$ mm.¹⁹

Tab. 2.5. Dosahovaná drsnost povrchu při použití různých druhů abraziva a rozdílné velikosti abrazivních zrn¹⁹

Druh abraziva	Velikost zrna [μm]	Drsnost povrchu R_a [μm]
Elektrokorund Al_2O_3	10	0,20 – 0,50
	25	0,25 – 0,53
	50	0,38 – 0,96
Karbid křemíku SiC	20	0,30 – 0,50
	50	0,43 – 0,86
Skleněné kuličky	50	0,30 – 0,96

Pro volbu správného druhu abraziva je několik faktorů, podle kterých je možné se řídit a vybrat nejvhodnější druh pro použité zařízení:

- při použití měkčího a tím i levnějšího abraziva (křemíkový písek) je opotřebování trysky menší, než když se použije abrazivo tvrdší a tím i dražší (elektrokorund nebo granát),
- cena abraziva není vždy v lineárním vztahu k provozním charakteristikám. Např. cena křemíkového písku, který má nižší účinnost je asi o 20 – 40 % nižší než je cena granátu. Naopak použití křemíkového písku namísto granátu je ekonomičtější v případě řezání hliníku nebo skla, kdy křemíkový písek v závislosti na ostatních parametrech procesu řezání zpomaluje celý proces o 20 – 40 %,
- technicky a ekonomicky vhodné materiály abraziva nejsou vždy vhodné pro svoje okolí a životní prostředí. Proto je brusné materiály potřeba volit s ohledem na bezpečnostní požadavky a zdravotní požadavky nezávadnosti brusiv,
- nejméně důležitý faktor pro volbu brusiva je způsob recyklace brusiv. Klasické druhy brusiva, jako jsou křemičitý písek nebo granát se při procesu řezání mění v prášek a proto jsou nevhodné na recyklaci. Naopak ocelová drť, ocelové broky jako alternativní abrazivní materiály mají díky svým magnetickým vlastnostem předurčený způsob separace v případě řezání nekovových materiálů (např. beton).¹⁹

Působení abraziva je hlavním výsledkem při dělení tvrdých materiálů. Vysokorychlostní proud vody unáší abrazivní částice a dopravuje je na řezaný materiál obrobku. Finnie vyvinul model popisující erozi materiálu obrobku abrazivními částmi. Obr. 2.20. znázorňuje kinematické a geometrické parametry pro tento model, který je dán vztahem (4) a je založený na odstranění určitého množství materiálu za pomoci jedné určité abrazivní částice, která má určitou trajektorii.¹

$$V_m = \frac{m_p \cdot v_p^2}{\sigma_f \cdot K \cdot \psi} \cdot f(\varphi) \quad (4)$$

kde:

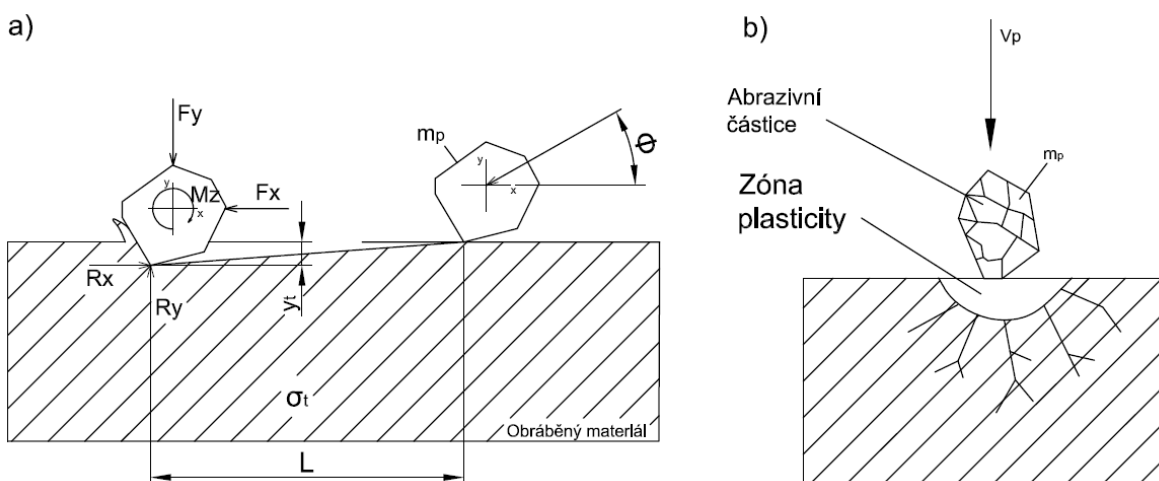
K poměr vertikální a horizontální síly,
 ψ funkce úhlu, pod kterým částice zasáhne řezaný materiál,
 $f(\varphi)$.. funkce úhlu, pod kterým částice zasáhne řezaný materiál,
 σ_f napětí řezaného materiálu [Pa],
 m_p hmotnost abrazivní částice [kg],
 v_p rychlost abrazivní částice [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].¹

$$f(\varphi) = \sin(2 \cdot \varphi) - \frac{6}{K} \cdot \sin^2 \varphi \quad \text{pro} \quad \tan \varphi = \frac{K}{6} \quad (5)$$

$$f(\varphi) = \frac{K \cdot \cos^2 \varphi}{6} \quad \text{pro} \quad \tan \varphi = \frac{K}{6} \quad (6)$$

$$K = \frac{F_y}{F_x} \cong 2 \quad (7)$$

Rovnice vyjadřuje práci, která je vykonaná při odstraňování určitého objemu materiálu erozí a je zlomkem kinetické energie abrazivní částice. Rozdíl rovnice (5) od rovnice (4) je v tom, že práce při obrábění je vypočítaná jako výsledek množství odstraněného materiálu a napětí materiálu.¹



Obr. 2.20. Charakteristika odstraňování materiálu abrazivní částicí¹

- a) mikrodělení,
 b) laterální šíření trhlin.

Poměr vertikální a horizontální síly je v rovnici (4) označen písmenem K, $\psi = L \cdot y_t^{-1}$ (viz. obr.2.20.) a $f(\varphi)$ je funkcí úhlu dopadu abrazivní částice, která dopadne na řezaný materiál. Poměr L ku y_t se nemění a bylo zjištěno, že obvykle se rovná 2.¹

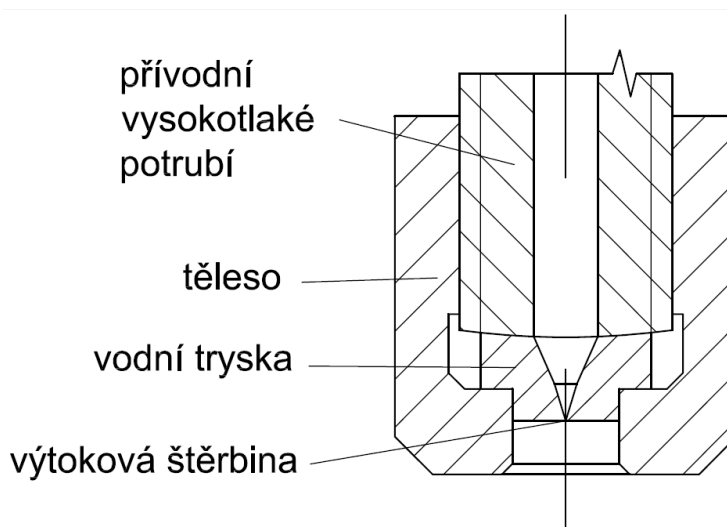
2.9. Trysky

Trysky ovlivňují kvalitu vodního paprsku a tím i kvalitu řezu a z toho důvodu se řadí mezi nejdůležitější součást zařízení. Při řezání vodním paprskem se používají dva druhy trysek:

- tryška na řezání čistou vodou,
- tryška na řezání hydroabrazivním paprskem.²

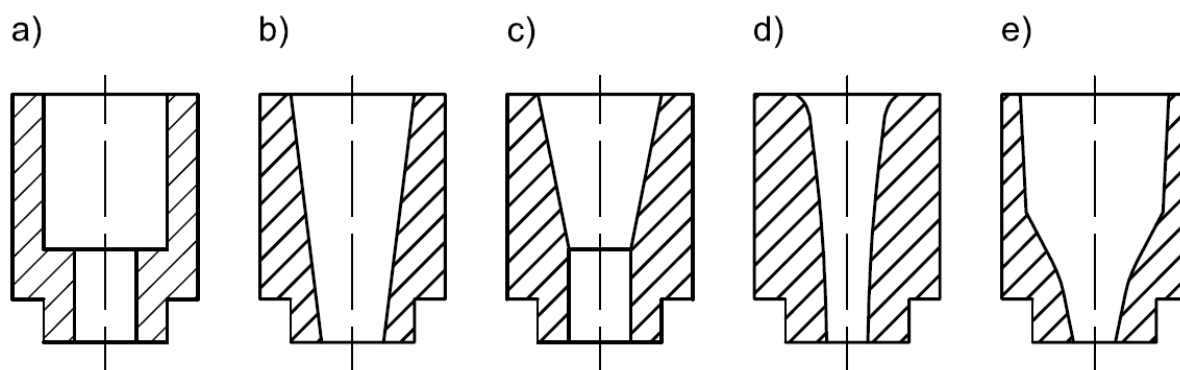
2.9.1. Trysky na řezání čistou vodou

Vnitřní část trysky s výtokovým otvorem neboli štěrbinou, která má průměr od 0,075 mm se vyrábí ze slinutého karbidu nebo safíru. Z hlediska údržby se v současné době nejvíce používají trysky z diamantu, který má několika násobně vyšší pracovní životnost a díky tomu se prodlužuje doba mezi údržbami. Diamantová tryška je však až 10 násobně dražší než tryška korundová nebo safírová. Safírová tryška má průměrnou pracovní dobu okolo 200 hodin, potom se výtokový otvor v trysce zanese nečistotami a minerálními usazeninami vody a tryška se musí vyměnit za novou. Diamantová tryška má naopak výhodu, že po usazení se může tryška vyčistit a následně může znovu produkovat vysokotlaký koherentní paprsek. Konstrukce řezací hlavy s vodní tryskou je zobrazena na obr.2.21.¹⁹



Obr.2.21. Příklad konstrukce řezací hlavy s vodní tryskou¹⁹

Při používání vodní trysky, která má velmi malé rozměry a vodní paprsek dosahuje vysokých rychlostí, je třeba věnovat pozornost při výrobě na dodržení souososti a drsnosti vnitřního povrchu. Vysokorychlostní paprsek vystupuje z trysky rychlostí $300 \pm 1400 \text{ m.s}^{-1}$ a i nejmenší odchylka tvaru a polohy může nepříznivě ovlivnit kvalitu paprsku. S ohledem na vykonávání práce s různými pracovními tlaky a různými pracovními médii, se vyrábí a používají různé tvary vodních trysek. Nejpoužívanější tvary vodních trysek jsou na obr.2.22.²

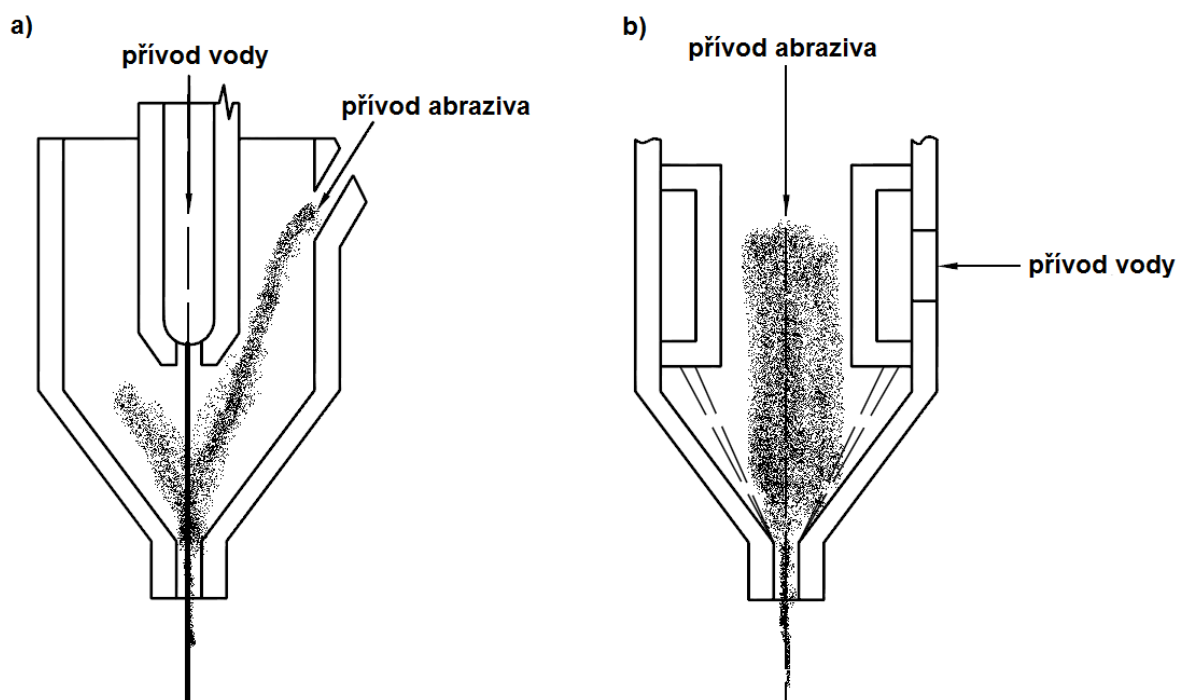
Obr.2.22. Tvary vodních trysek²

- a) válcová b) kuželová c) kombinovaná
d) kónická e) složená – bikubická

Životnost trysek je závislá na druhu a kvalitě pracovního média. Proto se voda upravuje filtrací a dále se může voda upravovat demineralizací, deionizací, zpětnou osmózou nebo použitím kondenzátu. Používání neupravené vody může až 5 – násobně snížit životnost trysky.²

2.9.2. Trysky na řezání hydroabrazivním paprskem

Oproti řezání čistým vodním paprskem je rozdíl v tom, že při řezání abrazivním paprskem se do proudu vody přidává jemné brusivo. Konstrukce abrazivních trysek se přizpůsobuje podle různých systémů a mechanismů, sloužících k přívodu abraziva. Různé typy přívodu brusiva do vodní trysky a jeho směšování s vodou je zobrazeno na obr.2.23.

Obr.2.23. Trysky pro systém AWJ¹⁹

- a) tryska s radiálním přívodem abraziva,
b) tryska s axiálním přívodem abraziva.

Tryska s radiálním přívodem abraziva (obr.2.23.a) se vyznačuje jednoduchou vyrobiteľnosťou s možnosťou použitia i pro čistý vodní paprsek. Tryska podle schématu na obr.2.23.b má výhodu použitia axiálního přívodu brusiva. Axiální přívod brusiva zlepšuje směšování s vodou a tím zmenšuje opotrebení obvodu trysky. Brusivo přivedené do směšovací komory se libovolně směšuje s vysokotlakou vodou a potom prochází přes sekundární trysku, jejíž otvor má průměr v rozmezí od $0,75 \div 2,5$ mm.¹⁹

Z dosavadní praxe vyplynulo, že využití technologie na řezání abrazivním vodním paprskem je nejmýsluplnější při řezání těžkoobrobiteľných materiálů, kovových materiálů, mramoru, betonu, skla apod., na jejichž obrobení by byl potřeba tlak čistého paprsku až $500 \div 1000$ MPa. V současnosti neexistuje cenově dostupné zařízení na vytvoření takto vysokých tlaků s patřičně vysokou životností pro průmyslové zařízení. U čistého vodního paprsku je kromě zvýšení pracovního tlaku až na 1000 MPa, potřeba brát v úvahu i zvýšení příkonu (až 30-krát) zařízení.²

Jako abrazivní materiály se v současnosti nejvíce používají granát, olivín, karbid křemíku, korundový prášek, ocelová drť apod. Vzhledem k těmto abrazivním materiálům jsou abrazivní trysky při řezání velmi intenzivně opotřebovávány, a proto se trysky vyráběly z materiálů vysoce odolných opotřebování, jako je karbid wolframu vyrobený práškovou metalurgií. Nyní se trysky vyrábí z kubického nitridu bóru, řezné keramiky a nebo z karbid wolframu s iontovou implantací.²

2.10. Výhody technologie vodního paprsku a porovnání s ostatními nekonvenčními technologiemi

Porovnání a znázornění výhod technologie vodního a hydroabrazivního paprsku s ostatními nekonvenčními technologiemi se může shrnout následovně:

- studený řez, který umožňuje řezat materiály citlivé na teplotu,
- v řezu nevznikají zbytkové napětí a mikrotrhliny,
- řezné hrany nevykazují tepelnou a mechanickou deformaci,
- energetická účinnost cca 80% (8 x víc než u laseru),
- proces řezání je pro obsluhu zdraví neškodný, protože je bezprašný a nevznikají při něm žádné plyny a páry
- malé ztráty materiálu v řezu, které jsou závislé na průměru výtokové štěrby v trysce (vodní paprsek $0,1 \div 0,25$ mm, abrazivní paprsek $0,8 \div 2$ mm),
- jedním vysokotlakým čerpadlem je možné napájet až 70 trysek vodního paprsku a nebo 8 trysek abrazivního paprsku
- životnost vodních trysek je cca 100 hodin a životnost abrazivních trysek je cca 50 hodin,
- je možné řezat i pod hladinou vody,
- je možné řezat bez omezení ve všech směrech, obrysech a tvarech,
- jednoduchost obsluhy a vysoká provozní spolehlivost,
- řezání problémových materiálů, jako jsou síťované materiály, vata atd.,
- vrtání i řezání jedním nástrojem,

- přesné leštění a čištění povrchů těžkoobrobitelných materiálů, jako je například keramika,
- není potřeba pevně upínat obrobek. ¹⁹

Porovnání hydroabrazivního paprsku s ostatními nekonvenčními technologiemi, které publikoval Hashish [22], porovnává hodnoty intenzity objemového úběru materiálu, požadavky na výkon u dané technologie a dosahovanou drsnost povrchu R_a . Porovnání vychází z předpokladu, že se obrábí trojrozměrná drážka. Výsledky porovnání jsou znázorněny v tab. 2.6. ¹⁹

Tab.2.6. Porovnání technologie hydroabrazivního paprsku s ostatními nekonvenčními metodami obrábění ¹⁹

PROCES	INTENZITA ÚBĚRU MATERIÁLU (VRR)	POŽADAVKY NA VÝKON	DOSAHOVANÁ DRSNOST POVRCHU R_a [μm]
ECM elektrochemické obrábění	$33 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro ocel v závislosti na ploše	jednosměrné napětí do 30 V, proud do 10000 A	$0,4 \div 6,3$
CHM chemické obrábění	cca $0,30 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro ocel v závislosti na ploše	<i>bez údajů</i>	<i>bez údajů</i>
EDM elektroerozivní obrábění	cca $7 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	napětí do 400 V, proud do 20 A	$0,2 \div 12$
LBM obrábění laserem	<i>nejednotné údaje bez údajů</i>	4000 V, 3000 J za ms	$0,8 \div 6,3$
PAM obrábění plazmou	cca $1000 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	200 KW	<i>bez údajů</i>
EBM obrábění elektronovým paprskem	do $5 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	130 V, 5000 mA	$0,8 \div 6,3$
AJM obrábění proudem abraziva	do $1 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Typický výkon $2 \div 5 \text{ KW}$	<i>bez údajů</i>
USM obrábění ultrazvukem	$4 \div 60 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	<i>bez údajů</i>	$0,3 \div 0,8$
AWJ obrábění vodním paprskem	$50 \div 200 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$10 \div 50 \text{ KW}$	$1 \div 10$

3. STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGICKÉ A KAPACITNÍ MOŽNOSTI FIRMY

Praktická část diplomové práce se řeší ve firmě AWAC, spol. s r.o. Firma AWAC má tři provozovny, které jsou v Praze, Brně a Plzni. Všechny tři pracoviště zakázkového řezání pracují ve dvousměnném provozu s možností rozšíření provozu na tři směny. Firma AWAC nabízí řezání materiálů v tloušťkách od 0,1 ÷ 350 mm s maximálním rozměrem polotovaru 3000 x 6000 mm.

V počtu řezacích strojů a vysokotlakých čerpadel patří společnost AWAC mezi největší komerční řezárny vodním paprskem na území ČR. V současné době provádí i 3D řezání, které umožňuje eliminovat úkoso, což je jeden z nejnovějších trendů v oblasti řezání vodním paprskem.²³

3.1. Strojní vybavení

Firma AWAC vlastní čtyři stroje pro řezání vodním paprskem. Tři stroje jsou od firmy MicroStep pro klasické řezání 2D a nově je ve firmě stroj Mach 4c na 3D řezání od firmy Flow. Od firmy Flow je rovněž i čerpadlo HyperJet 94i. Pro stroje od firmy MicroStep jsou čerpadla INGERSOLL-RAND Streamline™ SL-V 50.

3.1.1. Flow Mach 4c

Mach 4c je nejmodernější technologií na řezání vodním paprskem od firmy Flow. Obsahuje vyspělé HyperPressure™ technologie a pokročilé Dynamic Waterjet® XD technologie pro přesnější a rychlejší řezání a hlavně 3D řezání, což je největší předností tohoto stroje. Konstrukce stroje Mach 4c umožňuje použití až čtyř řezacích hlav.¹² Stroj Mach 4c je zobrazen na obrázku 3.1. a technické parametry jsou uvedeny v Tab.3.1.

HyperPressure™ – je nejmodernější technologií na vytváření vysokého tlaku. Již od počátků řezání vodním paprskem je snaha zvyšovat tlak vodního paprsku, protože s vyšším tlakem je větší produktivita. Zvýšením tlaku se vodní paprsek pohybuje rychleji, je užší v průměru a spotřebovává méně abraziva, což je nejvyšší náklad na řezání.¹²

Dynamic Waterjet XD – tato revoluční technologie nabízí řezání úkosů až do úhlu 60 stupňů. To poskytuje všestrannost a umožňuje snadné řezání 3D dílců.¹²

Tab.3.1. Technické parametry stroje Flow Mach 4c

Firma:	Flow
Typ:	Mach 4c
Rok výroby:	2013
Výkon:	75 KW
Síť:	220 V 50 Hz
Rozměry:	6000 x 4000 mm



Obr.3.1. Flow Mach 4c

HyperJet 94i

Čerpadlo HyperJet 94i (obr.3.2.) je výkonný, vysokotlaký obráběcí nástroj na řezání vodním paprskem. Čerpadlo je dimenzováno na 94 000 psi a dodává trvalý provozní tlak 87 000 psi.

Vlastnosti čerpadla HyperJet 94i:

- čerpadlo má výstupní tlak 87 000 psi (6 000 bar),
- velmi vysoké tlaky vody jsou monitorovány tlakovým převodníkem a zobrazeny v systému FlowCUT,
- duální filtrační systém odstraňuje částice větší než 0,5 mikronů absolutně,
- řízeno softwarem FlowMaster,
- obsahuje systém FlowSense včasné výstrahy pro důležité součásti. ¹²



Obr.3.2. Čerpadlo HyperJet 94i od firmy Flow

3.1.2. MicroStep AquaCut 4001.25WW

Stroje typu AquaCut jsou určeny na řezání kovových a nekovových materiálů vodním vysokotlakým paprskem. Stroj AquaCut 4001.25WW (obr.3.3) je vybavený dvěma řeznými hlavicemi, což zvyšuje produktivitu řezání. Technické parametry jsou uvedeny v Tab.3.2.

Tab.3.2. Technické parametry stroje AquaCut 4001.25WW

Firma:	MicroStep Group
Typ:	AquaCut 4001.25WW
Rok výroby:	2007
Výkon:	3 KW
Síť:	400 V 50 Hz
Rozměry:	7700 x 4440 mm



Obr.3.3. Stroj MicroStep AquaCut 4001.25WW

3.1.3. MicroStep AquaCut 4001.25

Stroj AquaCut 4001.25 (obr.3.4) má rozměry 5240 x 3700 mm a je vybavený jednou řezací hlavou. V Tab.3.3. jsou zobrazeny technické parametry stroje.

Tab.3.3. Technické parametry stroje AquaCut 4001.25

Firma:	MicroStep Group
Typ:	AquaCut 4001.25
Rok výroby:	2002
Výkon:	2,2 KW
Síť:	220 V 50 Hz
Rozměry:	5240 x 3700 mm



Obr.3.4. Stroj MicroStep AquaCut 4001.25

3.1.4. MicroStep AquaCut 1501.20W

Stroj AquaCut 1501.20W (obr.3.5.) o rozměrech 3000 x 2200 mm je vybaven jednou řezací hlavou a díky jeho rozměrům se hodí na řezání menších dílů. Jeho další technické parametry jsou uvedeny v Tab.3.4.

Tab.3.4. Technické parametry stroje AquaCut 1501.20W

Firma:	MicroStep Group
Typ:	AquaCut 1501.20W
Rok výroby:	2004
Výkon:	2 KW
Síť:	230 V 50 Hz
Rozměry:	3000 x 2200 mm



Obr.3.5. Stroj MicroStep AquaCut 1501.20W

3.1.5. Kompresor KAESER SX 26

KAESER SX 26 (obr.3.6.) je šroubový kompresor s klínovým pohonem. Firma KAESER KOMPRESSOREN tento druh pohonu zavedla jako jedna z prvních výrobců kompresorů. U většiny modelových řad jsou kompresory vybaveny zařízením na automatické dopínání řemenu a díky němu zůstává stupeň účinnosti převodu dobrý po celou dobu užívání. U řady SX se používá plochý řemen, který nevyžaduje žádné dopínání. V tabulce 3.5. jsou technické údaje kompresoru KAESER SK 26. ²⁴

Tab.3.5. Technické parametry kompresoru KAESER SX 26

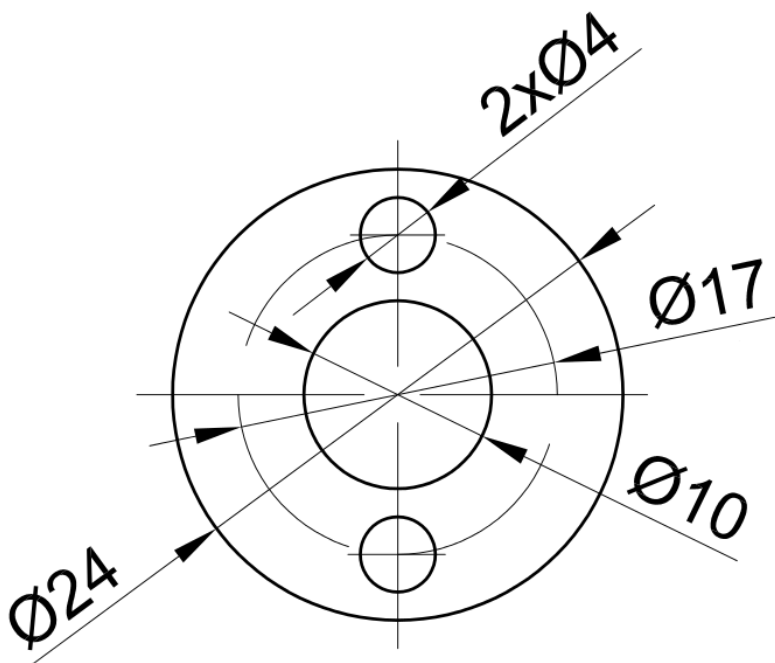
Firma:	KAESER
Typ:	SX 26
Tlak:	8 bar
Dodávané množství:	2,5 m ³ .min ⁻¹
Výkon:	15 KW
Rozměry:	800 x 820 x 1020 mm



Obr.3.6. Kompresor KAESER SK 26

4. ROZBOR POTENCIÁLNÍ SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY

Při technologii řezání vodním paprskem se řezou součásti různého typu a tvaru. Jako potenciální součástková základna byla vybrána součást příruba (obr.4.), kde polotovarem je plech o tloušťce 10 mm. Součásti přírubového tvaru jsou často vyráběny technologií řezání vodním paprskem, a proto byla tato součást vybrána jako hlavní představitel. Příruba o průměru 24 mm je tvořena dvěma dírami o průměru 4 mm a středovou dírou s průměrem 10 mm. Výroba součásti bude zavedena na všech čtyřech strojích v roční dávce 630000 kusů.



Obr.4.1. Součást příruba

5. NÁVRH STROJNÍHO VYBAVENÍ PROVOZU S OHLEDEM NA POŽADOVANÉ KAPACITY

Návrh strojního vybavení se stanovuje s ohledem na kapacitní propočty. Kapacitní propočty jsou počítány na součást příruba. Jelikož kusový čas výroby součásti na strojích od firmy MicroStep je jiný než na 3D stroji od firmy Flow, tak budou provedeny dva výpočty. Výpočty označeny indexem I jsou pro stroje Microstep AquaCut a výpočty označeny indexem II jsou pro stroj Flow Mach 4c. Řezné podmínky jsou uvedeny v tab.5.1.

Tab.5.1. Řezné podmínky pro součást příruba

n	Název stroje	Rozměry stroje	Kusový čas	Směnnost
[-]	[-]	[mm]	[min]	[-]
1	Flow Mach 4c	6000 x 4000	0,733	2
2	MicroStep AquaCut 4001.25WW	7700 x 4440	1,55	2
3	MicroStep AquaCut 4001.25	5240 x 3700	1,55	2
4	MicroStep AquaCut 1501.20W	3000 x 2200	1,55	2

Kapacitní propočty řeší vztah mezi plánovaným výrobním programem a výrobním profilem navrhovaného objektu. Při navrhování nového objektu se vypočítaný výrobní profil jen realizuje. Pokud se navrhuje racionalizace, pak se existující výrobní profil jen optimálně přizpůsobí plánovanému výrobnímu programu. Kapacitní propočty zároveň slouží pro určování investičních i provozních nákladů.

Technologický projektant může v různých případech provádět tzv. obrácený kapacitní propočet. Tento postup se používá v případech, bere-li se za předepsanou veličinu výrobní kapacita již existujícího objektu a hledá se výrobní plán, který bude mít optimální využití daných kapacit při splnění ekonomických pravidel reprodukčního procesu.²⁵

Kapacitním výpočtem se stanovují teoretické potřeby:

- strojů a zařízení,
- dělníků,
- manipulačních prostředků,
- inženýrsko – technických a administrativních pracovníků,
- výrobních, pomocných, správních a sociálních ploch,
- energií dle jednotlivých druhů.²⁵

5.1. Vstupní hodnoty

Pro výpočet kapacitních propočtů je potřeba stanovit určité vstupní hodnoty, které jsou uvedeny v Tab.5.2.

Tab.5.2. Tabulka vstupních hodnot

název součásti	Příruba
výrobní kapacita	630 000 ks/rok
hmotnost součásti	0,027 kg
roční využitelné časové fondy:	
Er – efektivní časový roční fond ručního pracoviště v jedné směně	2008
Es – efektivní časový roční fond strojního pracoviště v jedné směně	1848
Ed – efektivní časový fond dělníka	1753
směnnost:	
Ss – směnnost strojních pracovišť	2 směny
Sr – směnnost ručních pracovišť	2 směny
koeficient překračování norem:	
kpns - koeficient překračování norem strojní	1,2
kpnr - Koeficient překračování norem ruční	1,2

5.1.1. Roční využitelné časové fondy:

Pro určení potřebného množství pracovišť, strojů, zařízení a dělníků je potřeba znát jejich časové možnosti, kolik hodin v roce mohou pracovat. Při výpočtech se vychází z počtu pracovních dnů a kalendářního roku. Efektivní časové fondy jsou jiné pro ruční pracoviště, stroj a dělníka. ²⁵

a) Počet dní pro přerušovaný provoz

Počet dní pro přerušovaný provoz se vypočítá z počtu pracovních dnů v roce a doby jedné směny. Z celkového počtu 365 dnů v roce, tvoří 110 dnů soboty a neděle, dalších 11 dnů jsou státní svátky (v průměru 2/7 z nich jsou v sobotu a neděli). Výpočet viz. Vzorec 8. ²⁵

$$D = 365 - 110 - \left(11 \cdot \frac{2}{7}\right) = 251 \text{ dní/rok} \quad (8)$$

b) Efektivní časový roční fond ručního pracoviště v jedné směně

U ručního pracoviště v jedné směně je roční fond stejný, jako celkový roční počet pracovních hodin ve směně, nepočítá se tedy s odstavením ručního pracoviště na opravy. Roční fond ručního pracoviště v jedné směně se tedy vypočítá z počtu dní pro přerušovaný provoz vynásobený délkou směny, která je 8 hodin. ²⁵

$$E_r = D \cdot t_s \quad (9)$$

Kde:

E_r efektivní časový roční fond ručního pracoviště v jedné směně [h/rok]

D počet dní pro přerušovaný provoz [dny]

t_s doba jedné směny [h]

$$E_r = 251 \cdot 8 = 2008 \text{ h/rok}$$

c) Efektivní časový roční fond strojního pracoviště v jedné směně

Podle nejnovějších pozorování bylo zjištěno, že stroj bývá 12 dnů z celkového počtu pracovních dnů odstaven z titulu plánovaných oprav a údržby a 3 dny z titulu poruchy, což je neplánovaná oprava. Tyto dny opravy tvoří přibližně 6% z celkového počtu pracovních dnů.²⁵

$$E_s = E_r - (0,04 \div 0,08) \cdot E_r \quad (10)$$

Kde:

E_s efektivní časový roční fond strojního pracoviště v jedné směně [h/rok]

E_r efektivní časový roční fond ručního pracoviště v jedné směně [h/rok]

$$E_s = 2008 - (0,08 \cdot 2008) = 1848 \text{ [h/rok]}$$

d) Efektivní časový fond dělníka

Při stanovení fondu dělníka se musí při výpočtu zahrnout snížení fondu o průměrnou délku dovolené a neplánovanou absenci, jako je například: nemoc, placené volno na výkon funkcí, atd.²⁵

$$E_d = E_r - (15 + 15) \cdot \frac{42,5}{5} \quad (11)$$

Kde:

E_d efektivní časový fond dělníka [h/rok]

E_r efektivní časový roční fond ručního pracoviště v jedné směně [h/rok]

$$E_d = 2008 - (15 + 15) \cdot \frac{42,5}{5} = 1753 \text{ [h/rok]}$$

5.1.2. Směnnost

Počet směn je ve firmě AWAC, spol. s r.o. stanoven na dvě směny (ranní a odpolední), ale při větší výrobní dávce je možnost rozšíření o noční směnu na celkový počet tří směn. V kapacitních výpočtech se však bude počítat se dvěma směnami.

5.1.3. Koeficient překračování norem

Překračování daných norem se projeví, když dělník vlivem zdokonalování práce při opakované činnosti dosáhne určité zručnosti a dovednosti. Koeficient překračování norem se volí v rozmezí $1,1 \div 1,3$.²⁶

5.2. Výpočet počtu strojního pracoviště a jeho využití

Počet strojů se stanoví z celkového potřebného času na výrobu součásti u všech kusů za rok, při dvousměnném provozu. Teoretický počet strojů se vypočítá z následujícího vzorce:²⁶

$$P_{th} = \frac{t_k \cdot N}{60 \cdot E_s \cdot S_s \cdot k_{pns}} \quad (12)$$

Kde:

- P_{th} teoretický počet strojů [ks]
- N počet kusů vyráběných za rok [ks]
- t_k čas potřebný pro provedení dané operace na daném stroji
- E_s efektivní fond stroje v jedné směně [h/rok]
- S_s směnnost strojního pracoviště
- K_{pn} ... koeficient překračování norem
- P_{sk} ... skutečný počet strojů (zvolený) [ks]

$$P_{thI} = \frac{1,55 \cdot 630\,000}{60 \cdot 1\,848 \cdot 2 \cdot 1,2} = 3,669$$

$$P_{skI} \cong 4 \text{ stroje}$$

$$P_{thII} = \frac{0,733 \cdot 630\,000}{60 \cdot 1\,848 \cdot 2 \cdot 1,2} = 1,735$$

$$P_{skII} \cong 2 \text{ stroje}$$

Vypočítaná teoretická hodnota množství strojů nevychází jako celé číslo, a proto se množství strojů zaokrouhluje na vyšší celé číslo. Zvýšením počtu strojů však snižujeme využití stroje. Proto v případech kdy vychází malé využití stroje, je snaha o snížení potřebného času na výrobu součásti a tím snížit počet strojů pro danou operaci.

Využití stroje se vypočítá ze vzájemného poměru P_{th}/P_{sk} a po vynásobení stem vyjde využití stroje v procentech.²⁶

$$\eta = \frac{P_{th}}{P_{sk}} \cdot 100 \quad (13)$$

Kde:

- η využití stroje [%]
- P_{th} teoretický počet strojů [ks]
- P_{sk} ... skutečný počet strojů (zvolený) [ks]

$$\eta I = \frac{3,669}{4} \cdot 100 = 91,7 \%$$

$$\eta II = \frac{1,735}{2} \cdot 100 = 86,8 \%$$

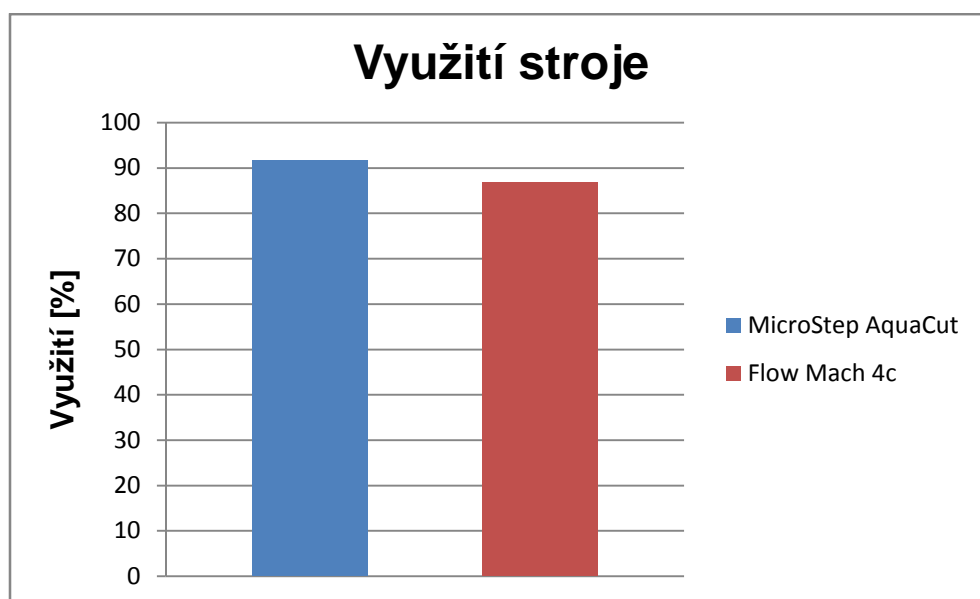
Z výpočtu strojních pracovišť vychází, že pro sériovou výrobu součásti Příruba v počtu 630 000 kusů za rok jsou potřeba 4 stroje MicroStep AquaCut. Využití strojů MicroStep AquaCut vychází na 91,7 %. Firma AWAC vlastní pouze tři stroje od této firmy, ale stroj s označením MicroStep AquaCut 4001.25WW je vybaven dvěma řezacími hlavy, které můžou řezat současně. Stroj s touto specifikací tak můžeme počítat, jako stroje dva. Jelikož u tohoto stroje je dostačující jeden pracovník, tak v dalších výpočtech budeme počítat pouze se třemi stroji značky MicroStep.

Stroj Flow Mach 4c zhotoví součást za téměř poloviční čas než stroje od firmy MicroStep. Využití strojů od firmy Flow je 86,8 % při dvou strojích. Jelikož firma AWAC vlastní stroj Flow Mach 4c pouze jeden, tak se přikoupení dalšího stroje pro výrobu součásti příruba, kde není potřeba využít technologii 3D řezání nejvíce příliš ekonomicky. Porovnání a výsledné hodnoty strojních pracovišť jsou uvedeny v tab.5.3. a zobrazeny v grafu na obr. 5.1.

Při dalších výpočtech pro součást příruba se tedy bude uvažovat pouze se třemi stroji od firmy MicroStep, které firma vlastní a nemusí tak přikupovat další stroj. Stroj Flow Mach 4c se tak může využít pro výrobu jiných součástí, kde by se lépe využila jeho efektivnost a především možnost 3D řezání.

Tab.5.3. Výsledné hodnoty pro strojní pracoviště

n	t _{kn}	P _{thn}	P _{skn}	η	Stroj
[-]	[min]	[-]	[ks]	[%]	
1	1,55	2,139	3	91,7	MicroStep AquaCut
2	0,733	1,011	2	86,8	Flow Mach 4c



Obr. 5.1. Využití strojů na řezání vodním paprskem

5.3. Výpočet pracovníků

Výpočet celkového počtu pracovníků se skládá z dělníků výrobních, pomocných dělníků a pomocného personálu, pracovníků kontroly a počtu inženýrsko-technických pracovníků a administrativních pracovníků.

5.3.1. Výpočet výrobních dělníků

Počet výrobních dělníků se stanoví podle následujícího vztahu: ²⁶

$$D_{VS} = \frac{t_k \cdot N}{60 \cdot E_S \cdot k_{pns}} \quad (14)$$

Kde:

D_{VS} .. počet výrobních dělníků

t_k čas potřebný pro provedení dané operace na daném stroji

N počet kusů vyráběných za rok [ks]

E_S efektivní fond stroje v jedné směně [h/rok]

k_{pns} .. koeficient překračování norem

$$D_{VS} = \frac{1,55 \cdot 630\,000}{60 \cdot 1848 \cdot 1,2} = 7,33 \approx 8$$

Z vypočítaného celkového počtu výrobních dělníků se vypočítá celkový evidenční počet výrobních dělníků: ²⁶

$$D_{eVS} = D_{VS} \cdot \frac{E_S}{E_d} \quad (15)$$

Kde:

D_{eVS} .. evidenční stavy strojních dělníků
 D_{VS} .. počet výrobních dělníků
 E_S efektivní fond stroje v jedné směně [h/rok]
 E_d efektivní časový fond dělníka [h/rok]

$$D_{eVS} = 8 \cdot \frac{1848}{1753} = 8,43 \approx 9$$

Celkový evidenční počet dělníků D_{eV} pak získáme součtem evidenčních strojních dělníků a evidenčních pomocných dělníků.²⁵

$$D_{eV} = D_{eVS} + D_{eP} \quad (16)$$

Kde:

D_{eV} ... celkový evidenční počet dělníků
 D_{eVS} .. evidenční stav strojních dělníků
 D_{eP} ... evidenční stav pomocných dělníků

$$D_{eV} = 9 + 4 = 13$$

5.3.2. Výpočet pracovníků kontroly jakosti

Pracovníci kontroly jakosti se vypočítávají obdobným způsobem jako výrobní dělníky z časů kontrolních operací. Počet pracovníků kontroly jakosti se tedy stanoví 5 ÷ 7 % z celkového počtu výrobních dělníků.²⁶

$$D_K = (0,05 \div 0,07) \cdot D_{VS} \quad (17)$$

Kde:

D_K počet pracovníků kontroly jakosti
 D_{VS} .. počet výrobních dělníků

$$D_K = 0,05 \cdot 8 = 0,4 \approx 1$$

5.3.3. Výpočet pomocných dělníků a obslužného personálu

Výpočet pomocných dělníků a obslužného personálu se stanoví z doporučeného procentuálního poměru mezi výrobními a pomocnými dělníky.²⁵

$$D_P = D_{VS} \cdot 0,35 \quad (18)$$

Kde:

D_P počet pomocných dělníků celkem
 D_{VS} .. počet výrobních dělníků

$$D_P = 8 \cdot 0,35 = 2,8 \approx 3$$

Evidenční počet pomocných dělníků navýšíme o 10 %. ²⁵

$$D_{ep} = 1,1 \cdot D_p \quad (19)$$

Kde:

D_{ep} ... evidenční stav pomocných dělníků

D_p počet pomocných dělníků celkem

$$D_{ep} = 1,1 \cdot 2 = 2,2 \approx 3$$

Dále se musí stanovit počet pracovníků pomocné obsluhy (uklízečky, telefonistky), který je $1,5 \div 3$ % z celkového evidenčního počtu výrobních dělníků. ²⁶

$$D_{Pop} = (0,015 \div 0,03) \cdot D_{eV} \quad (20)$$

Kde:

D_{Pop} . počet pracovníků pomocné obsluhy

D_{eV} ... celkový evidenční stav výrobních dělníků

$$D_{Pop} = 0,015 \cdot 13 = 0,195 \approx 0,2$$

Evidenční počet pracovníků pomocné obsluhy navýšíme od 10 %. ²⁶

$$D_{ePop} = 1,1 \cdot D_{Pop} \quad (21)$$

Kde:

D_{ePop} . evidenční počet pracovníků pomocné obsluhy

D_{Pop} . počet pracovníků pomocné obsluhy

$$D_{ePop} = 1,1 \cdot 0,2 = 0,22 \approx 0,3$$

5.3.4. Inženýrsko-techničtí a administrativní pracovníci

Mezi pracovníky ITA patří administrativní pracovníci, konstruktéři, technologové a mistři. Celkový počet ITA pracovníků se stanoví, jako $15 \div 25$ % z celkového počtu pomocných a výrobních evidenčních pracovníků. ²⁷

$$ITA = (0,15 \div 0,25) \cdot (D_{eV} + D_{ePop}) \quad (22)$$

Kde:

ITA ... počet inženýrsko-technických pracovníků a administrativních pracovníků

D_{eV} ... celkový evidenční stav výrobních dělníků

D_{ePop} . evidenční počet pracovníků pomocné obsluhy

$$ITA = 0,2 \cdot (13 + 0,3) = 2,66 \approx 3$$

Tento počet inženýrsko-technických a administrativních pracovníků by měl být rozdělen v tomto poměru:

30 % -administrativa

20 % -konstruktéři

50 % -operativní řízení (mistři a technologové) ²⁵

5.3.5. Celkový počet pracovníků útvaru

Celkový počet pracovníků útvaru se stanoví jako součet všech evidenčních pracovníků jednotlivých skupin, tzn. součet evidenčních výrobních dělníků, evidenčních pracovníků pomocné obsluhy a počet inženýrsko-technických pracovníků a administrativních pracovníků. ²⁷

$$P_C = (D_{eV} + D_{ePop} + ITA) \quad (23)$$

Kde:

P_C celkový počet pracovníků útvaru

D_{eV} ... celkový evidenční stav výrobních dělníků

D_{ePop} . evidenční počet pracovníků pomocné obsluhy

ITA ... počet inženýrsko-technických pracovníků a administrativních pracovníků

$$P_C = (13 + 2 + 3) = 18$$

5.4. Výpočet ploch

Výsledným součtem všech plochy je celková plocha útvaru. Plocha útvaru se stanoví součtem plochy provozní, správní a sociální.

5.4.1. Výpočet výrobních ploch

Výpočet celkové výrobní plochy je dán součtem všech ploch strojních a ručních pracovišť. Pro strojní pracoviště je potřeba plocha podle druhu a velikosti stroje, viz. tabulka 5.3.

Tab.5.3. Velikost potřebné plochy pro dané strojní pracoviště

n	Počet strojů	Potřebná plocha [m ²]	Druh stroje
1.	1	41,76	Flow Mach 4c
2.	1	55,54	MicroStep Group AquaCut 4001.25WW
3.	1	35,42	MicroStep Group AquaCut 4001.25
4.	1	16,8	MicroStep Group AquaCut 1501.20W
celkem	4	$F_V = 149,52 \text{ m}^2$	

U každého strojního pracoviště jsou plochy zvětšeny tak, že ze strany obsluhy je přidáno 1 200 mm a z ostatních stran je přidáno 600 mm.

5.4.2. Výpočet pomocné podlahové plochy

Pomocná plocha se vypočítá ze statisticky zpracovaných informací, které říkají, že pomocná plocha tvoří 40 ÷ 60 % výrobní plochy.²⁵

$$F_P = F_{Phn} + F_{Pú} + F_{Pskl} + F_{Pdc} + F_{Pk} = (0,4 \div 0,6) \cdot F_V \quad (24)$$

Kde:

- F_P celková pomocná plocha [m^2]
- F_{Phn} .. pomocná plocha hospodaření s náradím [m^2]
- $F_{Pú}$... pomocná plocha údržby [m^2]
- F_{Pskl} . pomocná plocha skladová [m^2]
- F_{Pdc} .. pomocná plocha vnitřních dopravních cest [m^2]
- F_{Pk} ... pomocná plocha kontroly [m^2]

$$F_P = 0,4 \cdot 149,52 = 59,8 \, m^2$$

Strukturální rozložení jednotlivých ploch je potom následující:²⁵

$$F_{Phn} = (14 \div 16)\% \cdot F_P \quad (25)$$

Kde:

- F_{Phn} .. pomocná plocha hospodaření s náradím [m^2]
- F_P celková pomocná plocha [m^2]²⁵

$$F_{Phn} = 0,14 \cdot 59,8 = 8,37 \, m^2$$

$$F_{Pú} = (14 \div 16)\% \cdot F_P \quad (26)$$

Kde:

- $F_{Pú}$... pomocná plocha údržby [m^2]
- F_P celková pomocná plocha [m^2]²⁵

$$F_{Pú} = 0,14 \cdot 59,8 = 8,37 \, m^2$$

$$F_{Pskl} = (27 \div 30)\% \cdot F_P \quad (27)$$

Kde:

- F_{Pskl} . pomocná plocha skladová [m^2]
- F_P celková pomocná plocha [m^2]²⁵

$$F_{Pskl} = 0,27 \cdot 59,8 = 16,15 \, m^2$$

$$F_{Pdc} = (32 \div 35)\% \cdot F_P \quad (28)$$

Kde:

- F_{Pdc} .. pomocná plocha vnitřních dopravních cest [m^2]
- F_P celková pomocná plocha [m^2]²⁵

$$F_{Pdc} = 0,32 \cdot 59,8 = 19,14 \text{ m}^2$$

$$F_{Pk} = (7 \div 9)\% \cdot F_P \quad (29)$$

Kde:

F_{Pk} ... pomocná plocha kontroly [m^2]

F_P celková pomocná plocha [m^2] ²⁵

$$F_{Pk} = 0,07 \cdot 59,8 = 4,19 \text{ m}^2$$

Pro podlahovou plochu údržbářské dílny se musí nejdřív stanovit počet strojů údržby a z nich se potom určí podlahová plocha údržby. ²⁵

$$P_{SKú} = 0,01 \cdot P_{sk} \quad (30)$$

Kde:

$P_{SKú}$. přibližný počet strojů údržby [ks]

P_{sk} ... počet strojů v údržbě [ks]

$$P_{SKú} = 0,01 \cdot 3 = 0,03 \approx 1 \text{ ks}$$

Pro výpočet plochy údržbářské dílny se stanovuje plocha $20 \div 30 \text{ m}^2$ na jeden stroj údržby. ²⁵

$$F_{Pú} = (20 \div 30) \cdot P_{SKú} \quad (31)$$

Kde:

$F_{Pú}$... plocha údržbářské dílny [m^2]

$P_{SKú}$. přibližný počet strojů údržby [ks]

$$F_{Pú} = 20 \cdot 1 = 20 \text{ m}^2$$

Potřebná plocha pracoviště kontroly je stanovena na $5 \div 6 \text{ m}^2$ na jednoho pracovníka. ²⁵

$$F_{Pk} = D_{KI} \cdot f_k \quad (32)$$

Kde:

F_{Pk} ... plocha pracoviště kontroly [m^2]

D_{KI} ... počet kontrolorů v jedné směně

f_k měrná plocha kontrolního pracoviště ($5 \div 6 \text{ m}^2$) [m^2]

$$F_{Pk} = 1 \cdot 5 = 5 \text{ m}^2$$

Skladová plocha se skládá z plochy vstupního skladu, výstupního skladu a meziskladu. Sklady jsou tzv. zásobníky dílny a shromaždiště materiálu, který by při uskladnění u strojů znemožňoval pohyb okolo stroje a znesnadňoval manipulaci s materiálem. ²⁵

Výpočet skladové plochy: ²⁶

$$F_{Pskl} = F_{Pvs} + F_{Pms} + F_{Pvys} \quad (33)$$

Kde:

F_{Pskl} . celková skladová plocha [m^2]

F_{Pvs} .. plocha vstupního skladu

F_{Pms} . plocha meziskladu

F_{Pvys} . plocha výstupního skladu

$$F_{Pskl} = 8,08 + 8,08 = 16,15 \text{ m}^2$$

Výpočet plochy meziskladu: ²⁶

$$F_{Pms} = \frac{Q_{\check{c}} \cdot N \cdot s_0 \cdot t \cdot i}{D \cdot q \cdot s} \quad (34)$$

Kde:

F_{Pms} . plocha meziskladu [m^2]

$Q_{\check{c}}$ čistá váha součásti [kg]

N počet vyráběných součástí [ks]

s_0 koeficient odpadu

t doba skladování [dnů]

i počet kooperací

D počet pracovních dní

q dovolené zatížení podlahy [$kg \cdot m^{-2}$]

s koeficient plošného využití skladu

Koeficient odpadu s_0 se stanovuje v rozmezí $1,1 \div 1,3$. Mezisklad slouží k uskladnění materiálu po krátkou dobu, proto se volí $t = 3 \div 5$ dní. Zatížení podlahy meziskladu je $15\,000 \div 20\,000 \text{ Pa}$ ($1500 \text{ kg} \cdot m^{-2}$). Protože se prostor meziskladu nevyužije dokonale, tak se ve vzorci volí koeficient využití s ($s = 0,25 \div 0,5$). ²⁵

$$F_{Pms} = \frac{0,027 \cdot 630\,000 \cdot 1,1 \cdot 3 \cdot 1}{251 \cdot 1500 \cdot 0,25} = 0,58 \text{ m}^2$$

Při sériové výrobě takto malé součásti vychází plocha meziskladu tak malá, že ji můžeme zanedbat a celkovou plochu skladu rozdělit jen na vstupní a výstupní sklad. Výpočet plochy vstupního a výstupního skladu:

$$F_{Pvs} = F_{Pvys} = \frac{F_{Pskl}}{2} \quad (35)$$

Kde:

F_{Pvs} .. plocha vstupního skladu [m^2]

F_{Pvys} . plocha výstupního skladu [m^2]

F_{Pskl} . celková skladová plocha [m^2]

$$F_{Pvs} = F_{Pvys} = \frac{16,15}{2} = 8,08 \text{ m}^2$$

Dále se provede výpočet pro zpřesněnou plochu podlahových cest:

$$F_{Pdc} = 0,5 \cdot (F_{Phn} + F_{Pú} + F_{Pskl} + F_{Pk}) \quad (36)$$

Kde:

F_{Pdc} .. pomocná plocha vnitřních dopravních cest [m²]
 F_{Phn} .. pomocná plocha hospodaření s náradím [m²]
 $F_{Pú}$... pomocná plocha údržby [m²]
 F_{Pskl} . celková skladová plocha [m²]
 F_{Pk} ... pomocná plocha kontroly [m²]

$$F_{Pdc} = 0,5 \cdot (20 + 16,15 + 5) = 20,58 \text{ m}^2$$

Výpočet celkové hodnoty pomocných ploch:

$$F_P = F_{Pdc} + F_{Phn} + F_{Pú} + F_{Pskl} + F_{Pk} \quad (37)$$

Kde:

F_P celková hodnota pomocných ploch [m²]
 F_{Pdc} .. pomocná plocha vnitřních dopravních cest [m²]
 F_{Phn} .. pomocná plocha hospodaření s náradím [m²]
 $F_{Pú}$... pomocná plocha údržby [m²]
 F_{Pskl} . celková skladová plocha [m²]
 F_{Pk} ... pomocná plocha kontroly [m²]

$$F_P = 20,58 + 20 + 16,15 + 5 = 61,73 \text{ m}^2$$

5.4.3. Výpočet provozní podlahové plochy

Celková provozní podlahová plocha je dána součtem plochy výrobní a pomocné.

$$F_{Pr} = F_P + F_V \quad (38)$$

Kde:

F_{Pr} celková provozní podlahová plocha [m²]
 F_P celková hodnota pomocných ploch [m²]
 F_V Celková výrobní plocha [m²]

$$F_{Pr} = 61,73 + 149,52 = 211,25 \text{ m}^2$$

5.4.4. Výpočet správní plochy

Tato plocha se počítá z počtu ITA pracovníků a normované plošné potřeby na jednoho pracovníka určité kategorie. Vypočtená plocha se pak zvětší o 35 ÷ 40 % a to je plocha chodeb, výtahů a schodišť.

- Na technika se počítá 5 ÷ 6 m²,
- na konstruktéra 8 ÷ 12 m²,
- na administrativního pracovníka 5 ÷ 6 m².²⁵

$$F_{spr} = (T \cdot 5 + A \cdot 4,5 + K_p \cdot 10) \cdot 1,4 \quad (39)$$

Kde:

F_{spr} ... plocha správní [m²]
 T počet technologů
 K_p počet konstruktérů
 A počet administrativních pracovníků

$$F_{spr} = (1 \cdot 5 + 1 \cdot 4,5 + 1 \cdot 10) \cdot 1,4 = 27,3 \text{ m}^2$$

5.4.5. Výpočet sociální plochy

Sociální plocha zahrnuje plochu šaten, umýváren, WC a přilehlé plochy (chodby, schodiště, výtahy). Plocha šaten se volí ve velikosti 0,8 m² na jednoho pracovníka.²⁶

$$F_{\text{šat}} = 0,8 \cdot (D_{eV} + D_{eP} + D_{ePOP}) \quad (40)$$

Kde:

$F_{\text{šat}}$... plocha šaten [m²]

D_{eV} ... celkový evidenční počet dělníků

D_{eP} ... evidenční stav pomocných dělníků

D_{ePOP} ... evidenční počet pracovníků pomocné obsluhy

$$F_{\text{šat}} = 0,8 \cdot (13 + 4 + 2) = 15,2 \text{ m}^2$$

U umyváren se počítá s potřebnou plochou 0,3 ÷ 0,4 m² na dělníky jedné směny.²⁶

$$F_{um} = \frac{(0,3 \div 0,4) \cdot (D_{eV} + D_{eP} + D_{ePOP})}{S_m} \quad (41)$$

Kde:

F_{um} ... plocha umýváren [m²]

D_{eV} ... celkový evidenční počet dělníků

D_{eP} ... evidenční stav pomocných dělníků

D_{ePOP} ... evidenční počet pracovníků pomocné obsluhy

S_m počet směn

$$F_{um} = \frac{0,3 \cdot (13 + 4 + 2)}{2} = 2,85 \text{ m}^2$$

U WC se počítá s 1 zařízením na 15 ÷ 20 lidí o ploše 2 m².²⁶

$$F_{WC} = \frac{2 \cdot P_C}{15} \quad (42)$$

Kde:

F_{WC} .. plocha WC [m²]

P_C celkový počet pracovníků útvaru

$$F_{WC} = \frac{2 \cdot 18}{15} = 2,4 \text{ m}^2$$

Celkovou sociální plochu pak navýšíme o 35 ÷ 45 %, což je plocha chodeb, výtahů a schodišť.

$$F_{SOC} = 1,4 \cdot (F_{\text{šat}} + F_{um} + F_{WC}) \quad (43)$$

Kde:

F_{SOC} . celková sociální plocha [m^2]

$F_{\text{šat}}$... plocha šaten [m^2]

F_{um} ... plocha umývárny [m^2]

F_{WC} .. plocha WC [m^2]

$$F_{SOC} = 1,4 \cdot (15,2 + 2,85 + 2,4) = 28,63 \, m^2$$

5.4.6. Celková plocha útvaru

Celková plocha útvaru se skládá z ploch provozních, správních a sociálních. ²⁵

$$F_{\text{útv}} = F_{pr} + F_{spr} + F_{SOC} \quad (44)$$

Kde:

$F_{\text{útv}}$... celková plocha útvaru [m^2]

F_{Pr} celková provozní podlahová plocha [m^2]

F_{spr} ... plocha správní [m^2]

F_{SOC} . celková sociální plocha [m^2]

$$F_{\text{útv}} = 211,25 + 27,3 + 28,63 = 267,18 \, m^2$$

6. NÁVRH TECHNOLOGIE NA VZOROVOU SOUČÁST

Jako vzorová součást byla vybrána součást příruba (obr.6.1.). Je to součást přírubového typu, která se vyrábí v roční dávce 630 000 kusů. Tato součást se bude vyrábět nekonvenční technologií řezání abrazivním vodním paprskem na třech strojích MicroStep AquaCut.



Obr.6.1. Součást příruba

6.1. Hodnocení z hlediska technologičnosti konstrukce

Technologičnost konstrukce lze rozumět souhrn vlastností konstrukce, které zabezpečují nejehospodárnější a časově nejméně náročnou výrobu při optimálním plnění pracovních úkolů stroje a při technologické konstrukci detailů z hlediska spotřeby materiálu.²⁸

Hodnocení z hlediska technologičnosti konstrukce se tak nejčastěji provádí z hlediska:

- dodržení tvaru a geometrie,
- dodržení výrobních úchylek rozměrů a jakosti povrchu,
- zvýšení produktivity práce a efektivnosti.²⁸

6.1.1. Dodržení tvaru a geometrie

Součást Příruba je řezána hydroabrazivním paprskem z plechu o tloušťce 10 mm. Příruba má průměr 24 mm a v ní je vyříznuta středová díra o průměru 10 mm. Na součásti jsou ještě dvě díry o průměru 4 mm, které jsou umístěny na svislé ose roztečné kružnice o průměru 17 mm.

6.1.2. Zvýšení produktivity práce a efektivnosti výroby

Zvýšené produktivity práce a tím i vyšší efektivnosti výroby se může dosáhnout dobře zvoleným technologickým postupem, dobře zvoleným polotovarem a vhodnou manipulací. Zvýšení produktivity práce a efektivnost výroby tak může výrazně ovlivnit konstruktér technologií konstrukce výroby.²⁸

6.2. Volba materiálu

Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel 41 1523 (S235JRC+N). Je to ocel na ploché a dlouhé výrobky válcované za tepla, se zaručenou nárazovou prací při teplotě + 20 °C. Tato ocel s indexem +N může být následně tvářena za tepla nebo normalizačně žíhána (žíhání k odstranění vnitřního pnutí je dovoleno). Ocel je vhodná pro použití ve svařovaných, nýtovaných a šroubovaných konstrukcích. Ocel je vhodná ke svařování, ale s rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí pevností se mohou vyskytovat trhliny za studena.²⁹

6.3. Volba polotovaru

Jako polotovar bude použitý plech válcovaný za tepla. Vhodná velikost plechu se vybere podle následujícího propočtu vycházejícího z řezného plánu. Jako polotovar se vybere plech o rozměru s největším využitím materiálu.

6.4. Řezací plán

Pro volbu správné velikosti polotovaru a zvolení nejvýhodnější varianty umístění výřezků na plechu je potřeba vypočítat využití plechu pro každou variantu umístění a velikost plechu. Při řezání vodním paprskem se velikost můstku mezi součástmi volí 3 mm. Pro výpočet využití tabule je potřeba znát:

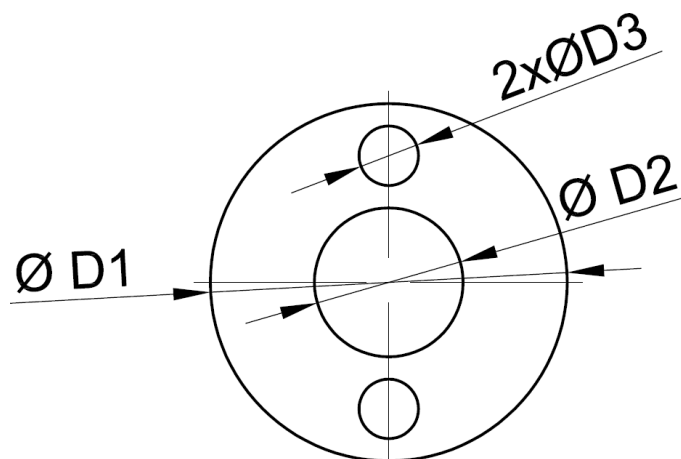
- Plocha součástí:

$$S_s = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} - \left(2 \cdot \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \right) \quad (45)$$

Kde:

S_s plocha součástí [mm²]

D_1, D_2, D_3 jsou rozměry součástí zakótované na obr.6.2.

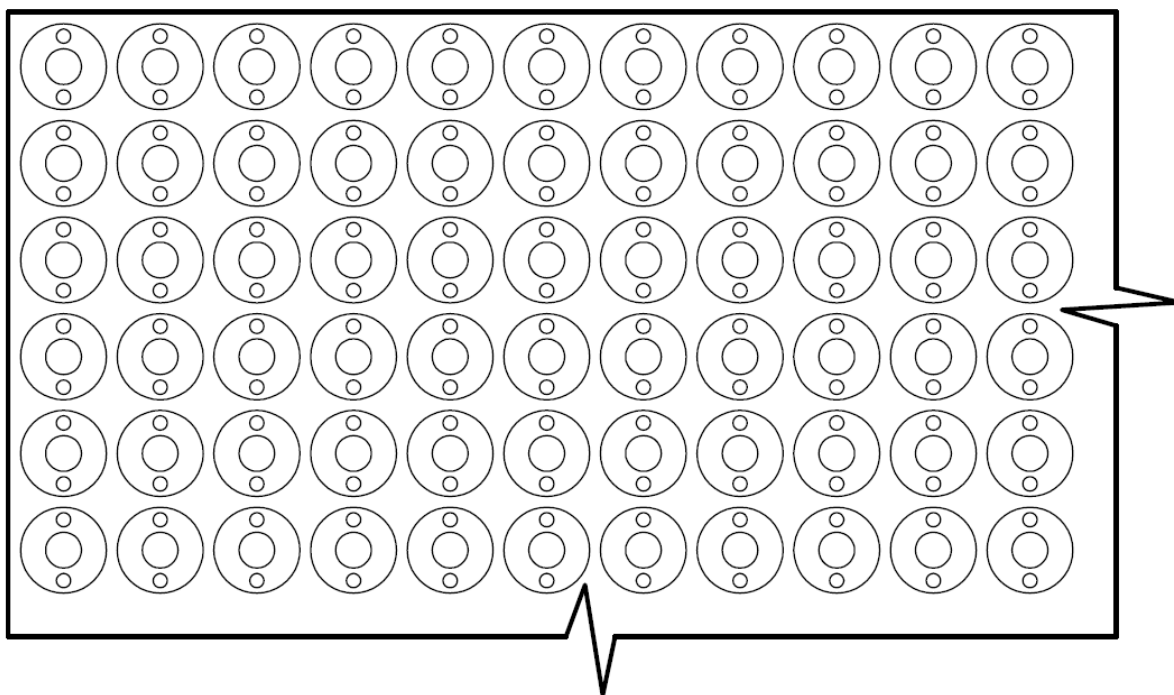


Obr.6.2. Znázornění rozměrů na součásti příruba

$$S_s = \frac{\pi \cdot 24^2}{4} - \frac{\pi \cdot 17^2}{4} - \left(2 \cdot \frac{\pi \cdot 4^2}{4} \right) = 200,27 \text{ mm}^2$$

6.4.1. Varianta A

Uspořádání součásti Příklad na plechu ve variantě A je zobrazeno na obrázku 6.3.



Obr.6.3. Návrh uspořádání – varianta A

Pro výpočet využití plechu se musí vypočítat následující vzorce:

- Plocha plechu:

$$S_p = a \cdot b \quad (46)$$

Kde:

S_p plocha plechu [mm^2]

a šířka plechu [mm]

b délka plechu [mm]

- Počet pásů z tabule:

$$N_{pás} = \frac{a}{a_p} \quad (47)$$

Kde:

$N_{pás}$.. počet pásů z tabule [ks]

a šířka plechu [mm]

a_p šířka pásu [mm]

- Počet výřezů z pásu plechu:

$$N_{výř} = \frac{b}{a_p} \quad (48)$$

Kde:

$N_{výř}$.. počet výřezů z pásu plechu [ks]
 b délka plechu [mm]
 a_p šířka plechu [mm]

- Počet výřezů z tabule plechu:

$$N = N_{pás} \cdot N_{výř} \quad (49)$$

Kde:

N počet výřezů z tabule plechu [ks]
 $N_{pás}$.. počet pásů z tabule [ks]
 $N_{výř}$.. počet výřezů z pásu plechu [ks]

- Využití tabule plechu:

$$\eta_p = \frac{S_s \cdot N}{S_p} \cdot 100 \quad (50)$$

Kde:

η_p využití tabule plechu [%]
 S_s plocha součásti [mm²]
 N počet výřezů z tabule plechu [ks]
 S_p plocha plechu [mm²]

a) Výpočet pro tabuli plechu 1 000 x 2 000 mm:

- Plocha plechu:

$$S_p = a \cdot b = 1\,000 \cdot 2\,000 = 2\,000\,000 \text{ mm}^2$$

- Počet pásů z tabule:

$$N_{pás} = \frac{a}{a_p} = \frac{1\,000}{27} = 37,04 \approx 37 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z pásu plechu:

$$N_{výř} = \frac{b}{a_p} = \frac{2\,000}{27} = 74,07 \approx 74 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z tabule plechu:

$$N = N_{pás} \cdot N_{výř} = 37 \cdot 74 = 2\,738 \text{ ks}$$

- Využití tabule plechu:

$$\eta_p = \frac{S_s \cdot N}{S_p} \cdot 100 = \frac{200,27 \cdot 2\,738}{2\,000\,000} \cdot 100 = 27,42 \%$$

b) Výpočet pro tabuli plechu 1 250 x 2 500 mm:

- Plocha plechu:

$$S_p = a \cdot b = 1\,250 \cdot 2\,500 = 3\,125\,000 \text{ mm}^2$$

- Počet pásů z tabule:

$$N_{pás} = \frac{a}{a_p} = \frac{1\,250}{27} = 46,29 \approx 46 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z pásu plechu:

$$N_{výř} = \frac{b}{a_p} = \frac{2\,500}{27} = 92,59 \approx 92 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z tabule plechu:

$$N = N_{pás} \cdot N_{výř} = 46 \cdot 92 = 4\,232 \text{ ks}$$

- Využití tabule plechu:

$$\eta_p = \frac{S_s \cdot N}{S_p} \cdot 100 = \frac{200,27 \cdot 4\,232}{3\,125\,000} \cdot 100 = 27,12 \%$$

c) Výpočet pro tabuli plechu 1 500 x 3 000 mm:

- Plocha plechu:

$$S_p = a \cdot b = 1\,500 \cdot 3\,000 = 4\,500\,000 \text{ mm}^2$$

- Počet pásů z tabule:

$$N_{pás} = \frac{a}{a_p} = \frac{1\,500}{27} = 55,55 \approx 55 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z pásu plechu:

$$N_{výř} = \frac{b}{a_p} = \frac{3\,000}{27} = 111,11 \approx 111 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z tabule plechu:

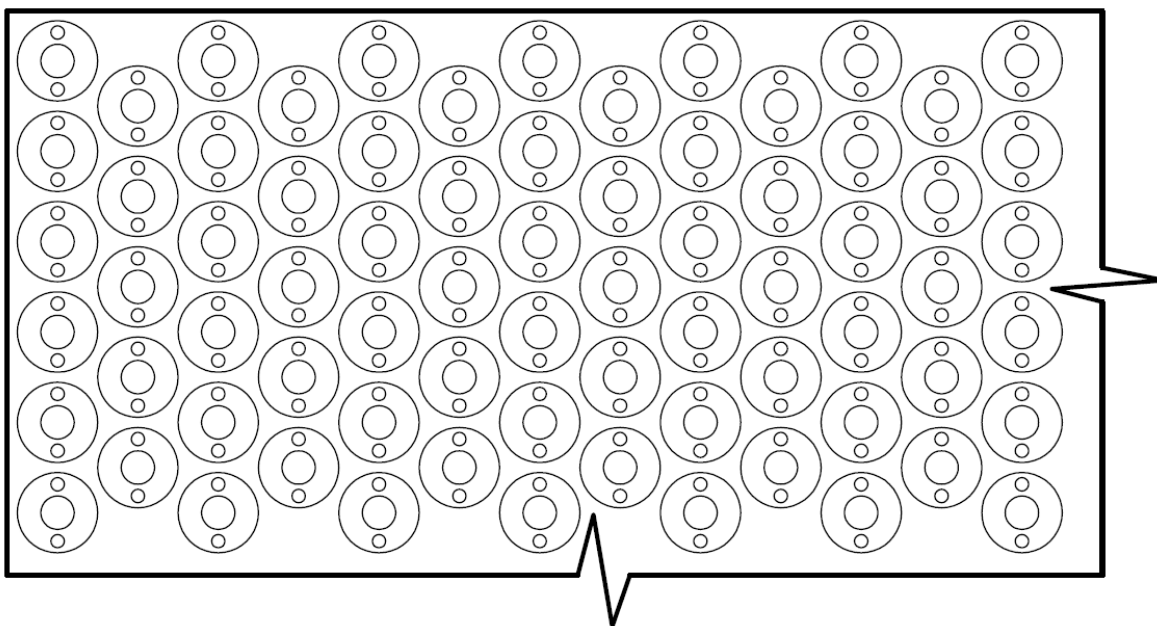
$$N = N_{pás} \cdot N_{výř} = 55 \cdot 111 = 6\,105 \text{ ks}$$

- Využití tabule plechu:

$$\eta_p = \frac{S_s \cdot N}{S_p} \cdot 100 = \frac{200,27 \cdot 6\,105}{4\,500\,000} \cdot 100 = 27,17 \%$$

6.4.2. Varianta B

Uspořádání součásti Příruba na plechu ve variantě B je zobrazeno na obr.6.4.



Obr.6.4. Návrh uspořádání – varianta B

a) Výpočet pro tabuli plechu 1 000 x 2 000 mm:

- Plocha plechu:

$$S_p = a \cdot b = 1\,000 \cdot 2\,000 = 2\,000\,000 \text{ mm}^2$$

- Počet pásů z tabule:

$$N_{pás} = \frac{a}{a_p} = \frac{1\,000}{27} = 37,04 \approx 37 \text{ ks}$$

$$N_{pásI} = 37 \text{ ks (pro první řadu)}$$

$$N_{pásII} = 36 \text{ ks (pro druhou řadu)}$$

- Počet výřezů z pásu plechu:

$$N_{výř} = \frac{b}{a_p} = \frac{2\,000}{24} = 83,33 \approx 83 \text{ ks}$$

$$N_{výřI} = 42 \text{ ks}$$

$$N_{výřII} = 41 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z tabule plechu:

$$N_I = N_{pásI} \cdot N_{výřI} = 37 \cdot 42 = 1\,554 \text{ ks}$$

$$N_{II} = N_{pásII} \cdot N_{výřII} = 36 \cdot 41 = 1\,476 \text{ ks}$$

$$N = N_I + N_{II} = 1\,554 + 1\,476 = 3\,030 \text{ ks}$$

- Využití tabule plechu:

$$\eta_p = \frac{S_s \cdot N}{S_p} \cdot 100 = \frac{200,27 \cdot 3\,030}{2\,000\,000} \cdot 100 = 30,34 \%$$

b) Výpočet pro tabuli plechu 1 250 x 2 500 mm:

- Plocha plechu:

$$S_p = a \cdot b = 1\,250 \cdot 2\,500 = 3\,125\,000 \text{ mm}^2$$

- Počet pásů z tabule:

$$N_{pás} = \frac{a}{a_p} = \frac{1\,250}{27} = 46,29 \approx 46 \text{ ks}$$

$$N_{pásI} = 46 \text{ ks}$$

$$N_{pásII} = 45 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z pásu plechu:

$$N_{výř} = \frac{b}{a_p} = \frac{2\,500}{24} = 104,17 \approx 104 \text{ ks}$$

$$N_{výřI} = 52 \text{ ks}$$

$$N_{výřII} = 52 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z tabule plechu:

$$N_I = N_{pásI} \cdot N_{výřI} = 46 \cdot 52 = 2\,392 \text{ ks}$$

$$N_{II} = N_{pásII} \cdot N_{výřII} = 45 \cdot 52 = 2\,340 \text{ ks}$$

$$N = N_I + N_{II} = 2\,392 + 2\,340 = 4\,732 \text{ ks}$$

- Využití tabule plechu:

$$\eta_p = \frac{S_s \cdot N}{S_p} \cdot 100 = \frac{200,27 \cdot 4\,732}{3\,125\,000} \cdot 100 = 30,33 \%$$

c) Výpočet pro tabuli plechu 1 500 x 3 000 mm:

- Plocha plechu:

$$S_p = a \cdot b = 1\,500 \cdot 3\,000 = 4\,500\,000 \text{ mm}^2$$

- Počet pásů z tabule:

$$N_{pás} = \frac{a}{a_p} = \frac{1\,500}{27} = 55,55 \approx 55 \text{ ks}$$

$$N_{pásI} = 55 \text{ ks}$$

$$N_{pásII} = 55 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z pásu plechu:

$$N_{výř} = \frac{b}{a_p} = \frac{3\,000}{24} = 125 \text{ ks}$$

$$N_{výřI} = 62 \text{ ks}$$

$$N_{výřII} = 62 \text{ ks}$$

- Počet výřezů z tabule plechu:

$$N_I = N_{pásI} \cdot N_{výřI} = 55 \cdot 62 = 3\,410 \text{ ks}$$

$$N_{II} = N_{pásII} \cdot N_{výřII} = 55 \cdot 62 = 3\,410 \text{ ks}$$

$$N = N_I + N_{II} = 3\,410 + 3\,410 = 6\,820 \text{ ks}$$

- Využití tabule plechu:

$$\eta_p = \frac{S_s \cdot N}{S_p} \cdot 100 = \frac{200,27 \cdot 6\,820}{4\,500\,000} \cdot 100 = 30,35 \%$$

6.4.3. Porovnání obou variant

Porovnání varianty A i B ve třech různých rozměrech je uvedeno v tabulce 6.1.

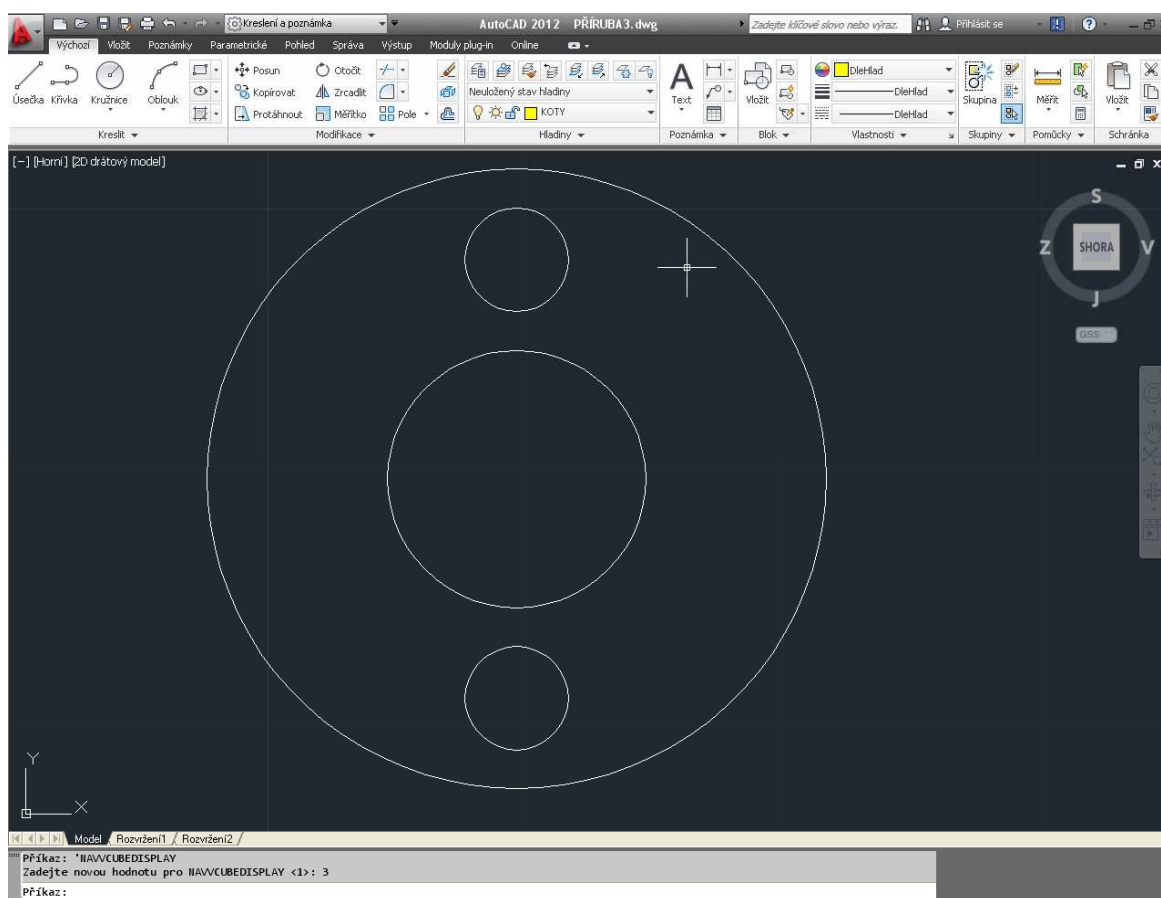
Tab.6.1. Porovnání variant v procentech

varianta	1 000 x 2 000 mm	1 250 x 2 500 mm	1 500 x 3 000 mm
A	27,42 %	27,12 %	27,17 %
B	30,34 %	30,33 %	30,35 %

Z tabulky je zřejmé, že nejlepší využití má uspořádání ve variantě B. Celkově jsou využití materiálu velmi malá, ale to je zapříčiněno velkým množstvím odřezávaného materiálu. Jako nejvýhodnější se jeví varianta B s rozměrem 1500 x 3000 mm. Jelikož ve variantě B vychází využití materiálu téměř identicky, tak jako výchozí polotovár se bude brát plech o rozměru 1 000 x 2 000 mm. Mezi nejdůležitější výhodou tohoto rozměru patří možnost ustavení dvou polotovarů vedle sebe na stroji MicroStep AquaCut 4001.25WW, který má dvě řezací hlavy a může tak řezat dvě součásti zároveň, čímž nám výrazně vzroste produktivita práce. Neméně důležitou výhodou při zvolení polotovaru o rozměru 1 000 x 2 000 mm je snadnější manipulace s materiálem.

6.5. Vytvoření CNC programu

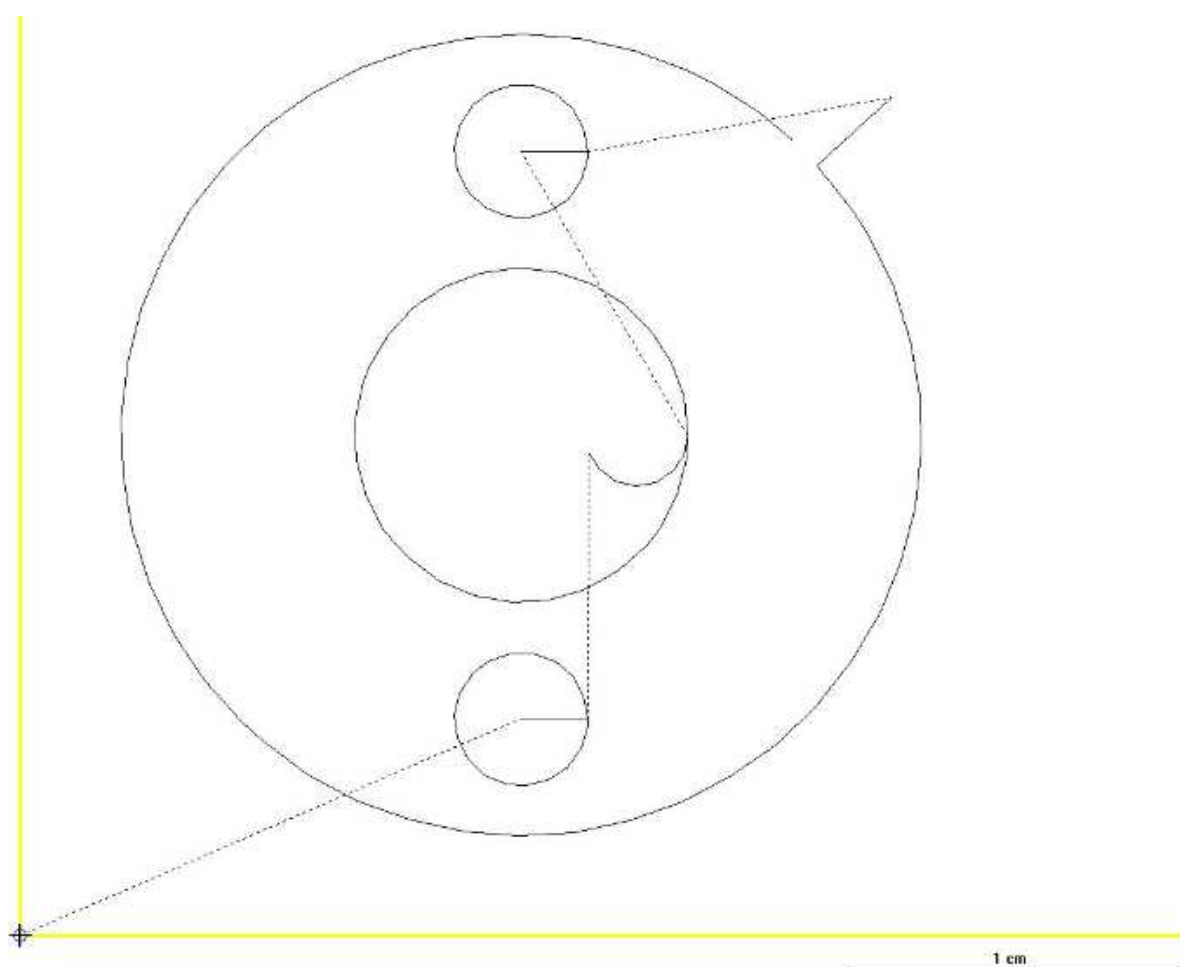
V prvním kroku je potřeba pro součást Příruba vytvořit řeznou konturu v programu AutoCAD podle výkresové dokumentace (obr.6.5.).



Obr.6.5. Vytvoření kontury v programu AutoCAD

Následně se v programu AsperWin3.5 určí řezací strategie (obr.6.6.), tedy pořadí řezu a dráhy. Obsluha v programu rozmístí součásti na plechu s uspořádáním ve variantě B, viz. kapitola 6.4.2. Vzdálenost mezi součástmi je volitelná. Pro součást příruha je můstek mezi součástmi stanoven na 3 mm. Po rozmístění součástí se na plechu se zvolí pořadí řezání následovně:

- řezat otvor $\varnothing 4$ mm,
- řezat středový otvor $\varnothing 10$ mm,
- řezat otvor $\varnothing 4$ mm,
- řezat obrys součásti $\varnothing 24$ mm.



Obr.6.6. Ukázka trajektorie řezu součásti Příruba

V posledním kroku před odesláním vygenerovaného NC kódu (Obr.6.7.) do stroje, je potřeba nastavit parametry řezání, jako jsou tloušťka materiálu, jakost materiálu, tlak vody, množství abraziva, korekce nástroje, apod. Nastavované parametry jsou uvedeny v Tab. 6.2.

Tab.6.2. Vstupní parametry řezání

tloušťka materiálu	10 mm
jakost materiálu	11 523
tlak vody	3 800 bar
množství abraziva	540 g.min ⁻¹
korekce nástroje / průměr abrazivní trysky	1,3 mm
rychlost	130 mm.min ⁻¹


```
G90
"PART priruba 0 391 23.50 15.00
G0 X15 Y6.5
M20
M3
M90 K159 L30
G1 X17
G41
G3 X13.537 Y7.863 I15 J6.5
G3 X15.141 Y4.505 I15 J6.5
G3 X17 Y6.5 I15 J6.5
M5
G40
G0 X17.046 Y14.479
G41
M3
M90 K159 L50
G3 X20 Y15 I18.4769 J15
G3 X10.223 Y16.478 I15 J15
G3 X19.127 Y12.177 I15 J15
M90 K159 L30
G3 X20 Y15 I15 J15
M5
G40
G0 X15 Y23.5
M3
G1 X17
G41
G3 X13.537 Y24.863 I15 J23.5
G3 X15.141 Y21.505 I15 J23.5
G3 X17 Y23.5 I15 J23.5
M5
G40
G0 X26.091 Y25.099
G41
M3
M90 K159 L40
G1 X23.873 Y23.079
G2 X25.422 Y20.948 I15 J15
M90 K159 L60
G2 X6.617 Y6.414 I15 J15
G2 X20.697 Y25.561 I15 J15
M90 K159 L40
G2 X23.133 Y23.823 I15 J15
M5
M21
G40
M30
```

Obr.6.7. Ukázka vygenerovaného NC programu na součást Příruba

Takto vygenerovaný NC kód je odeslán do stroje, kde po usazení polotovaru a nastavení nulového bodu může začít proces řezání. Na obr.6.8. je ukázka řezu součásti příruba.

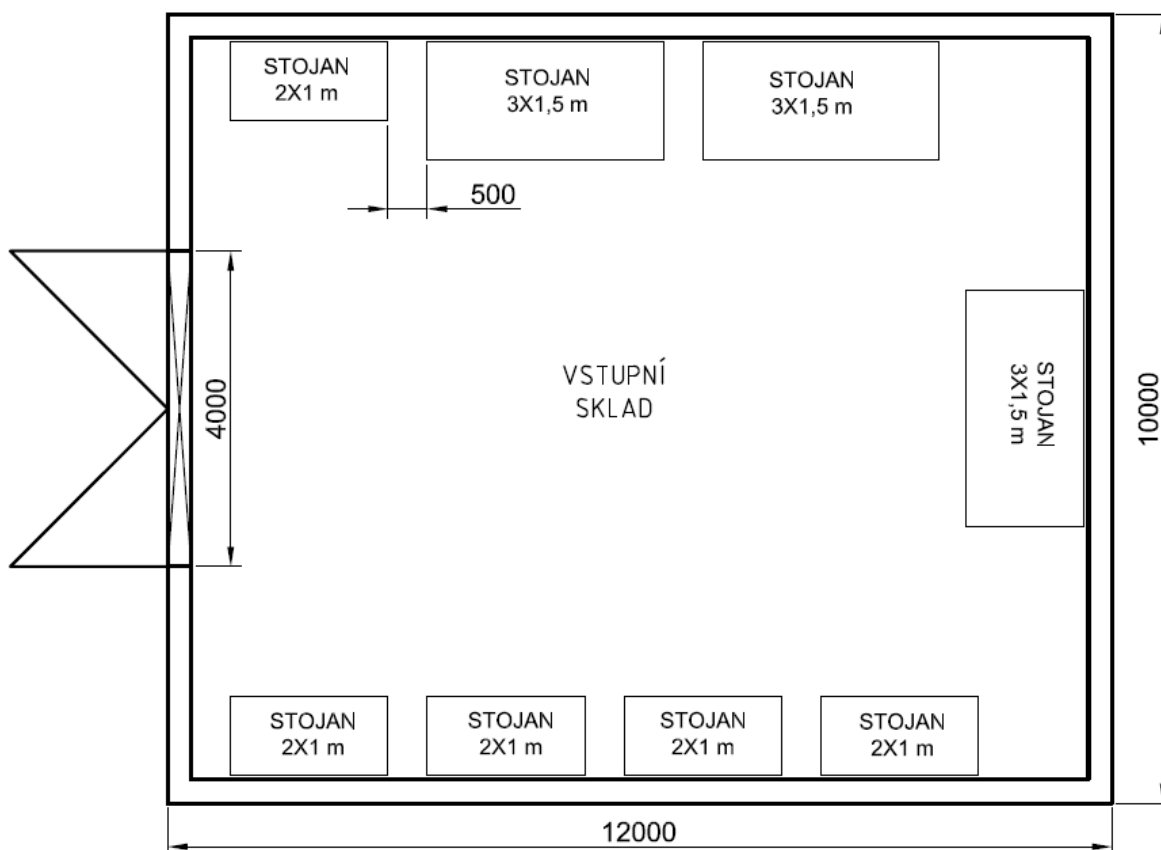


Obr.6.8. Řezání součásti příruba

7. NÁVRH RÁMCOVÉHO USPOŘÁDÁNÍ PROVOZU

V kapacitních výpočtech (kapitola 5.) vyšlo, že skutečné plochy ve firmě AWAC, spol. s r.o. jsou navrženy optimálně a pro danou výrobu součástí příruba v roční dávce 630 000 kusů jsou dostačující. U výpočtů vstupního skladu, výstupního skladu a meziskladu však není ve výpočtu zahrnuta velikost polotovaru, ale velikost hotové součásti, která je mnohem skladnější než polotovar. Z tohoto důvodu bych navrhoval současné skladové plochy nechat jako výstupní skladové plochy s plochami pro umístění abraziva. Pro vstupní skladové plochy bych navrhoval přistavět nový skladovací prostor. Vstupní sklad by se mohl přistavět vedle výrobní haly s dostatečně velkým prostorem, kde by nebyla omezována manipulace s plechy za pomoci vysokozdvizného vozíku. Návrh vstupního skladu je zobrazen na obr.7.1.

Navržený vstupní sklad má plochu 120 m^2 a vjezd je umožněn křídlovými vraty o šířce 4 metry. Ve skladu jsou umístěny tři stojany na plechy o rozměrech $3 \times 1,5$ metrů a pět stojanů na plechy o rozměrech 2×1 metrů. Výkresová dokumentace skladu a výrobní haly je v přílohách diplomové práce.



Obr.7.1. Návrh vstupního skladu

8. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Náklady na provoz stroje se řadí do režijních nákladů. Ovšem s ohledem na relativně vysoké pořizovací náklady stroje je výhodné náklady na jejich provoz z celkových režijních nákladů vyčlenit a přiřadit je k danému stroji. Náklady na provoz stroje se stanovují na jednu hodinu jeho provozu. Z toho se dále vypočítají náklady na jednu minutu provozu stroje a vynásobením časem řezu dostaneme náklady na obrobení jednoho kusu.³⁰

Pro stanovení ekonomických výpočtů potřebujeme znát určité vstupní hodnoty, jako jsou cena stroje, náklady na instalaci stroje, náklady na demontáž stroje, likvidační hodnota stroje, doba životnosti stroje, efektivní časový fond stroje za rok, fixní hodinová sazba a nakonec cenu polotovaru. Tyto vstupní hodnoty, získané od firmy AWAC, spol. s r.o. jsou uvedeny v tab.8.1.

Cena polotovaru je 2 512 Kč při použití plechu o rozměru 1 000 x 2 000 mm. Z plechu se vyřeže 3 030 ks součástí, a tak cena polotovaru na jednu součást vychází 0,83 Kč.

Tab.8.1. Nákladové vstupní hodnoty

Symbol	Parametr	Hodnota	Jednotka
C_s	Cena stroje	8 000 000	Kč
N_i	Náklady na instalaci stroje	200 000	Kč
N_d	Náklady na demontáž	150 000	Kč
L	Likvidační hodnota	1 600 000	Kč
Z	Doba životnosti	5	roků
F_{ef}	Efektivní časový fond stroje za rok	3 696	h
S_f	Fixní hodinová sazba	1 350	Kč.h ⁻¹
N_{pt}	Cena polotovaru	2 512	Kč
N_{pt}	Cena polotovaru na jednu součást	0,83	Kč

Konečnou cenu jedné součásti pak stanovíme z následujících výpočtů:

- Náklady na hodinu provozu stroje:³⁰

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d - L}{Z \cdot F_{ef}} \quad (51)$$

Kde:

N_{hs} ... náklady na hodinu provozu stroje [Kč.h⁻¹]

S_f fixní hodinová sazba [Kč.h⁻¹]

C_s cena stroje [Kč]

N_i náklady na instalaci stroje [Kč]

N_d náklady na demontáž [Kč]

L likvidační hodnota [Kč]

Z doba životnosti stroje [rok]

F_{ef} efektivní časový fond stroje za rok [h]

$$N_{hs} = 1350 + \frac{8000000 + 200000 + 150000 - 1600000}{5 \cdot 3696} = 1\,716 \text{ Kč} \cdot h^{-1}$$

- Náklady na minutu provozu stroje: ³⁰

$$N_{ms} = \frac{N_{hs}}{60} \quad (52)$$

Kde:

N_{ms} .. náklady na minutu stroje [Kč.min⁻¹]

N_{hs} ... náklady na hodinu provozu stroje [Kč.h⁻¹]

$$N_{ms} = \frac{1\,716}{60} = 28,6 \text{ Kč} \cdot h^{-1}$$

- Náklady na vyřízení jednoho kusu: ³⁰

$$N_{ks} = N_{ms} \cdot t_c \quad (53)$$

Kde:

N_{ks} ... náklady na vyřízení jednoho kusu [Kč]

N_{ms} .. náklady na minutu stroje [Kč.min⁻¹]

t_c čas řezu [min]

$$N_{ks} = 28,6 \cdot 1,55 = 44,33 \text{ Kč}$$

- Celková cena jednoho kusu: ³⁰

$$C_{ks} = N_{ks} + N_{pt} \quad (54)$$

Kde:

C_{ks} ... celková cena jednoho kusu [Kč]

N_{ks} ... náklady na obrobek jednoho kusu [Kč]

N_{pt} cena polotovaru [Kč]

$$C_{ks} = 44,33 + 0,83 = 45,2 \approx 46 \text{ Kč}$$

Při daných vstupních hodnotách byla vypočtena hodnota nákladů na hodinu provozu stroje MicroStep AquaCut na 1 716 Kč. Výroba jedné součásti Přířuba pak stojí 46 Kč.

9. DISKUZE

Pro zvolenou součást příruba v roční dávce 630 000 kusů za rok byly provedeny kapacitní výpočty, ze kterých vyšlo využití strojů MicroStep a strojů Flow. Pro stroj MicroStep bylo vypočteno, že pro danou výrobu jsou potřeba 4 strojní pracoviště, přičemž využitelnost strojů vychází 91,7 %. Stroj od firmy Flow dokáže součást vyrobit za téměř poloviční čas s využitelností 86,8 % při dvou strojních pracovištích.

Firma AWAC vlastní tři stroje MicroStep a jeden od firmy Flow. Jelikož jeden stroj od firmy MicroStep s označením AquaCut 4001.25WW má dvě řezné hlavy, díky kterým může řezat dvě součásti zároveň, tak ho můžeme uvažovat za dva plnohodnotné stroje.

Pro výrobu součásti příruba na strojích Flow by firma AWAC musela dokoupit jeden stroj, což se pro výrobu součásti, kde není potřeba využívat 3D technologie nejvíce úplně optimálně.

Součást se tak bude vyrábět na třech strojích MicroStep, kdy na jednom stroji AquaCut 4001.25WW se budou řezat dvě součásti zároveň. Tato varianta je ekonomicky velmi výhodná, protože pro obsluhu tohoto stroje je dostačující jeden pracovník, čímž se sníží náklady výroby o mzdu jednoho pracovníka. Na zbývajícím stroji od firmy Flow se tak může řezat jiná součást, na které by se lépe využila jeho efektivnost a především možnost řezání úkosu a 3D řezání.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se v první kapitole zabývá principem vodního paprsku. V této rešerši je interpretován princip nekonvenční metody řezání vodním paprskem, druhy vodního paprsku, vliv úběru materiálu na kvalitu povrchu a představení základního strojního vybavení.

Ve zbytku diplomové práce je řešení praktické části, která je realizována ve firmě AWAC, spol. s r.o. Pro danou součást příruba, která se vyrábí v počtu 630 000 kusů za rok, bylo potřeba určit strojní vybavení s ohledem na požadované kapacity. Výsledkem kapacitních výpočtů bylo, že se součást bude řezat na třech strojích MicroStep s využitím stroje 91,7 %, přičemž na jednom stroji s označením AquaCut 4001.25WW se budou řezat dvě součásti zároveň. Tuto technologii řezání umožňuje vybavení stroje s dvěma řezacími hlavami.

V dalším kroku kapacitních výpočtů se stanovila potřebná plocha útvaru na 267,18 m², která se skládá z ploch provozních, správních a sociálních. Podle vypočítaných výsledků lze stanovit, že skutečné plochy firmy AWAC jsou pro danou výrobu součásti příruba dostačující. U výpočtů skladů však nebyla zahrnuta velikost polotovaru, ale velikost hotové součásti, která je mnohem skladnější než polotovar. Z těchto důvodů a z důvodů lepší manipulace s plechy za pomoci vysokozdvizného vozíku bylo navrženo současné skladové plochy nechat jako výstupní skladové plochy s plochami pro umístění abraziva a pro vstupní skladové plochy bylo navrženo přistavět nový skladovací prostor. Výkresová dokumentace vstupního skladu a výrobní haly je v přílohách diplomové práce.

Následně se pro výběr nejvýhodnějšího polotovaru vypočítalo využití materiálu pro různé rozměry plechů, kde nejvýhodněji vyšla varianta B o rozměru plechu 1 000 x 2 000 mm s využitím 30,34 %. Jako polotovar je tedy zvolen plech o rozměru 1 000 x 2 000 mm z materiálu 11 523 (S235JRC+N). Dále se v programu AsperWin3.5 stanovila řezací strategie a nastavily další vstupní hodnoty. Po vygenerování NC kódu byl program odeslán do stroje, kde začala výroba součásti Příruba.

V ekonomickém zhodnocení se ze vstupních hodnot, získaných od firmy AWAC vypočítaly náklady na hodinu provozu stroje, náklady na minutu stroje a z nákladů na vyrobení jednoho kusu se stanovila celková cena jedné součásti na 46 Kč.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej Hloch. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*, 1.vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
2. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: 1998. 195s. ISBN 80-8057-091-4.
3. ROSHOLT, Robert L. Rosholt a Antonín VÍTEK. *An Administrative History of NASA: První sputnik "otcem" NASA*. Washington: NASA SP-4101, 1966, s. 668-769. ISBN NASA SP-4101.
<<http://mek.kosmo.cz/novinky/clanky/nasa/index.htm>>
4. *Nasa.gov* [online]. [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <www.nasa.gov>
5. *Engrailhistory.info* [online]. 2012 [cit. 2013-01-25]. Dostupné z: <<http://www.engrailhistory.info/e073.html>>
6. JUSTICH, Jan. *Strojnictvi.czweb.org* [online]. 18.05.2010 [cit. 2013-01-25]. Dostupné z: <<http://www.strojnictvi.czweb.org/www/view.php?cislocclanku=2010050005>>
7. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *MM Průmyslové spectrum* [online]. 19.07.2007 [cit. 2013-01-25]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>>
8. *Newagepublishers.com* [online]. 18.9.07 [cit. 2013-01-25]. Dostupné z: <<http://www.newagepublishers.com/samplechapter/001566.pdf>>
9. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. ISBN A240494.
10. *Jet Edge Water Jets* [online]. 2013 [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: <<http://www.jetedge.com>>

11. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. OPUS - VZDĚLANOSTNÍ SÍŤ K VÝROBNÍM TECHNOLOGIÍM. *Nekonvenční technologie obrábění*. Brno, 2012. Dostupné z: <<http://opus.fme.vutbr.cz>>
12. *Flow International Corporation* [online]. 2013 [cit. 2013-01-26]. Dostupné z: <<http://www.flowwaterjet.com/>>
13. *SCANDINAVIAN WATERJET* [online]. 2008 [cit. 2013-01-31]. Dostupné z: <<http://www.swa.se/page/70/industriell-waterjet.aspx>>
14. LOUIS, H., F. PUDE, CHR. VON RAD a R. VERSEMANN. UNIVERSITY OF HANNOVER. *ABRASIVE WATER SUSPENSION JET TECHNOLOGY: FUNDAMENTALS, APPLICATION AND DEVELOPMENTS* [online]. Hannover, 2003 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <<http://www.china-weldnet.com/English/information>>
15. *WARDJet* [online]. 2013 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <<http://www.wardjet.com/02-waterjet-relationship-parameters.html>>
16. KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *Nekonvenční technologie*. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. ISBN 80-7200-296-1.
17. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
18. *Bit Tooth Energy* [online]. 28.12.2012 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://bittooth.blogspot.cz/2012_12_01_archive.html>
19. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
20. *JETE MACHINERY* [online]. 2011 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <<http://www.cnjete.net>>
21. *Pražské vodovody a kanalizace: Tvrdost vody* [online]. 2013 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <<http://www.pvk.cz/tvrdost-vody.html>>
22. Hashish, M.: An Investigation of Milling with Abrasive – Waterjet, *ASME J. of Engineering for Industry, Vol 111, May. (1989) pp. 158 - 166*

23. AWAC [online]. 2013 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z:
<<http://www.awac.cz/cz>>
24. KAESER KOMPRESSOREN [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <<http://www.kaeser.cz/>>
25. HLAVENKA, Bohumil. *Projektování výrobních systémů: technologické projekty I*. Vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 197 s. ISBN 80-214-2871-6
26. HLAVENKA, Bohumil, Bohuslav OMASTA a Antonín MARTINEK. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Projektování výrobních systémů: Cvičení. druhé*. Brno, 1988
27. HLAVENKA, Bohumil. *Technologické projekty*. 3. vyd. Brno: VUT Brno, 1997, 41 s. ISBN 80-214-0928-2.
28. KOČMAN, Karel a Jiří PERNIKÁŘ. EDIČNÍ STŘEDISKO VUT. *Ročníkový projekt II - obrábění*. Brno, 2002.
29. Ferona [online]. 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z:
<<http://www.ferona.cz/cze/>>
30. PROKOP, Jaroslav. Prezentace určené k podpoře výuky předmětu Vybrané statě z obrábění. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	-	Administrativní pracovníci
A_t	mm	Vzdálenost vstupní trysky od materiálu
a	mm	Šířka plechu
AWJ	-	Abrazivní vodní paprsek
AJM	-	Obrábění proudem abraziva
Al_2O_3	-	Elektrokorund
ASJ	-	Paprsek abrazivní suspenze
b	mm	Délka plechu
CAD	-	Computer Aided Design – počítačem podporované navrhování
CHM	-	Chemické obrábění
C_{ks}	Kč	Celková cena jednoho kusu
C_s	Kč	Cena stroje
D	dny	Počet pracovních dnů v roce
D_{eP}	-	Evidenční stav pomocných dělníků
D_{ePOP}	-	Evidenční počet pracovníků pomocné obsluhy
D_{eV}	-	Celkový evidenční počet dělníků
D_{eVS}	-	Dělníci evidenční výrobní strojní
D_k	-	Kontrolní pracovníci
d_m	mm	Průměr výstupní trysky
d_n	mm	Průměr vodní trysky
D_p	-	Dělníci pomocní
D_{pop}	-	Dělníci pomocní - obsluhující personál
D_{vs}	-	Dělníci výrobní strojní
EBM	-	Obrábění elektronovým paprskem
ECM	-	Elektrochemické obrábění
E_d	h/rok	Časový fond dělníka
EDM	-	Elektroerozivní obrábění
E_r	h/rok	Časový fond ručního pracoviště
E_s	h/rok	Časový fond strojního pracoviště
F_{ef}	h	Efektivní časový fond stroje
f_k	$m^2/1$ prac.	Měrná plocha na 1 kontrolní pracoviště
F_p	m^2	Plocha pomocná
F_{pdc}	m^2	Plocha dopravních cest
F_{phn}	m^2	Plocha hospodaření s nářadím
F_{pk}	m^2	Plocha kontrolní
F_{pms}	m^2	Plocha mezikladů
F_{pr}	m^2	Plocha provozní
F_{pskl}	m^2	Plocha skladů
$F_{pú}$	m^2	Plocha údržby
F_{pvs}	m^2	Plocha vstupních skladů

F_{pvys}	m^2	Plocha výstupních skladů
F_{SOC}	m^2	Plocha sociální
F_{spr}	m^2	Plocha správní
$F_{\text{šat}}$	m^2	Plocha šaten
F_{um}	m^2	Plocha umývárny
$F_{\text{útv}}$	m^2	Plocha útvaru
F_v	m^2	Plocha výrobní
F_{wc}	m^2	Plocha WC
F_x	N	Složka síly v ose x
F_y	N	Složka síly v ose y
ITA	-	Inženýrsko-techničtí a administrativní pracovníci
i	-	Počet kooperací
K	-	Poměr vertikální a horizontální síly
K_p	-	Konstruktéři
k_{pn}	-	Koeficient překračování norem
L	Kč	Likvidační hodnota stroje
LBM	-	Obrábění laserem
M	$kg \cdot min^{-1}$	Množství abraziva
m_p	kg	hmotnost částice
N	ks	počet součástí
N_d	Kč	Náklady na demontáž stroje
N_{hs}	$Kč \cdot h^{-1}$	Náklady na hodinu provozu stroje
N_i	Kč	Náklady na instalaci stroje
N_{ks}	Kč	Náklady na vyřiznutí jednoho kusu
N_{ms}	$Kč \cdot h^{-1}$	Náklady na minutu stroje
$N_{pás}$	ks	Počet pásů z tabule
N_{pt}	Kč	Cena polotovaru
NTO	-	Nekonvenční technologie obrábění
$N_{výř}$	ks	Počet výřezů z pásu plechu
P_1	Pa	Tlak na píst o ploše S1
P_2	Pa	Tlak na píst o ploše S2
PAA	-	Polyakrylamid
PAM	-	Obrábění plazmou
P_C	-	Celkový počet pracovníků útvaru
PEO	-	Polyetyloxid
P_{sk}	ks	Skutečný počet strojů
P_{th}	ks	Teoretický počet strojů
Q	$m^3 \cdot min^{-1}$	Objem protékající vody
Q1 -Q5	-	Označení jakosti povrchu pro vodní paprsek
q	Pa	Zatížení plochy
$Q_{\check{c}}$	kg	Čistá hmotnost
Ra	μm	Střední aritmetická odchylka profilu
S_1	mm^2	Plocha velkého pístu
S_2	mm^2	Plocha malého pístu

s	-	Koeficient využití skladů
S_f	Kč.h ⁻¹	Fixní hodinová sazba
SiC	-	Karbid křemíku
s_m	-	Počet směn
s_o	-	Koeficient odpadu
S_p	mm ²	Plocha plechu
S_s	mm ²	Plocha součásti
ss	-	Směnnost strojní
T	-	Technologové
t	dny	Doba meziskladování
t_k	min	Čas kusový
USM	-	Obrábění ultrazvukem
V_m	m ³	Odehrané množství materiálu
v_p	m.s ⁻¹	rychlost částice
VRR	mm ³ .s ⁻¹	Intenzita úběru materiálu
WJM	-	Čistý vodní paprsek
η	%	Využití stroje
η_m	N	Hodnota mechanické účinnosti
σ_f	Pa	Napětí cílového materiálu
ψ	-	Funkce úhlu, pod kterým abrazivní částice zasáhne cílový materiál

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výkres součásti příruba
Příloha 2 Výkres výrobní haly